



UNIVERSIDAD DE CUENCA

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

“CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA DEL MACRO DESLIZAMIENTO DE LLAMACÓN.”

Trabajo de titulación previo a la
obtención del título de Ingeniero Civil

Director:

Ing. Pablo Ismael Guzmán Cárdenas Ph.D.

C.I.:0102260106

Autores:

Paula Katherine Gutiérrez Neira

C.I.: 0302041561

Pedro Javier Sánchez León

C.I.: 0104993969

Cuenca – Ecuador

2017



RESUMEN

La zona de Llamacón presenta movimientos de tierra mucho antes de construir la presa hidroeléctrica de Mazar (2010), un año después del llenado las fisuras y grietas del terreno se intensifican. Desde entonces en varias inspecciones se observó un mal manejo de drenajes superficiales. Los estudios anteriores se han basado en el control continuo del movimiento de tierra mediante pilas topográficas.

La delimitación inicial del macrodeslizamiento se realizó mediante fotointerpretación, observando: cambios de vegetación, escarpes, etc. La delimitación final se determinó con el método de campo, georreferenciando: afloramientos de agua, puntos de infiltración, grietas y cambios de vegetación.

Se realizó una comparación entre el caudal de septiembre de 2016 con la serie histórica de caudales de septiembre obtenidos con la ecuación del balance hídrico con el fin de analizar la influencia del agua en el macrodeslizamiento. Por las características de las cuencas se asume que no existe estrés hídrico y que la precipitación es descargada como escorrentía superficial instantánea. En las series de caudales generadas se observa una posible infiltración, sin embargo el caudal aforado está dentro de la serie histórica. También se realizó una transposición de caudales en donde se evidencia más la posible existencia de infiltración de agua.

Los resultados obtenidos muestran una posible influencia del agua en el macrodeslizamiento, sin embargo no existe precisión debido a la discontinuidad de las mediciones, con éstos resultados se propone realizar aforos continuos con vertederos, para posteriores estudios de infiltración que determinarán el grado de influencia del agua en el macrodeslizamiento.

PALABRAS CLAVES: Análisis hidrológico, macrodeslizamiento, delimitación, balance hídrico, trasposición de caudales, infiltración de agua.



ABSTRACT

The area of Llamacón have had landslide problems before the construction of Mazar's hydroelectric dam (2010), but a year after filling the reservoir a lot of cracks and fisures appeared. Since then, have been observed poor management of surface drainage. Until now, the studies have based on landslide control with topographical markers.

The initial macro-landslide delimitation has been made through photointerpretation. Looking for contour lines, vegetation changes, escarpments, etc. The final macro-landslide delimitation was determined georeferencing useful points like: water outcrops, water infiltration, vegetation changes and cracks.

It was realized a comparison between the water's flow rate measured on September 2016 and the historical series of September that were obtained with the simplified water balance equation in order to achieve if exists water's influence on the macro-landslide. According to basin's characteristics it was assumed that there was no water stress and the rain is discharged into the reservoir instantly. A possible water's influence can be observed in the water's flow rate series obtained, however the measure on September 2016 is in the range of the historical series. It was also analized water's flow rate infiltration with interbasin transfer where it was more evident the existence of water's infiltration.

The results indicate a possible water's influence in macro-landslide, however there is no precision in the results because of the discontinuity of water's flow rate measures. With the results it was proposed the continuous control of the zone with dumps for future water infiltration analysis that will determinate the extent of influence of water's infiltration in the macro-landslide.

KEY WORDS: Macro-landslide, delimitation, water balance, interbasin transfer, water infiltration.



ÍNDICE DE CONTENIDO

CAPÍTULO I GENERALIDADES.....	14
1.1 INTRODUCCIÓN.....	14
1.2 OBJETIVOS.....	16
1.3 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	17
1.4 CARACTERÍSTICAS DE LAS CUENCAS EN TORNO AL ANÁLISIS DE INFILTRACIÓN DE CAUDALES.....	20
CAPÍTULO 2 MATERIALES Y MÉTODOS.....	22
2.1 DELIMITACIÓN DEL MACRODESLIZAMIENTO.....	22
2.1.1 MÉTODO DIGITAL (GIS) ANÁLISIS DE MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES.....	22
2.1.2 MÉTODO DE CAMPO	23
2.2 ANÁLISIS HIDROMETEOROLÓGICO.....	24
2.3 TRANSPOSICIÓN DE CAUDALES.....	25
2.4 ECUACIÓN DEL BALANCE HÍDRICO.....	29
2.4.1 CORRECCIÓN DE TEMPERATURA DEL MACRODESLIZAMIENTO.....	30
2.4.2 EVAPOTRANSPIRACIÓN CON EL MÉTODO DE PENMAN-MONTEITH.....	31
2.4.3 EVAPOTRANSPIRACIÓN CON EL MÉTODO DE THORNTHWAITE.....	37
2.4.4 EVAPOTRANSPIRACIÓN CON EL MÉTODO DE BLANEY CRIDDLE....	39
2.5 CAMPAÑA DE AFOROS.....	40
2.5.1 MATERIALES EMPLEADOS.....	41
2.6 OBRAS HIDRÁULICAS	42
2.6.1 CAUDAL DE DISEÑO.....	42
2.6.2 VERTEDEROS	43
2.7 INTERPRETACIÓN DEL DIAGRAMA DE CAJA.....	46
2.7.1 CONSTRUCCIÓN DEL DIAGRAMA DE CAJA	46
CAPÍTULO 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	48
3.1 DELIMITACIÓN DEL MACRODESLIZAMIENTO.....	48
3.1.1 MÉTODO DIGITAL (GIS) ANÁLISIS DE MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES.....	48
3.1.2 MÉTODO DE CAMPO	48
3.1.3 COMPARACIÓN DE DELIMITACIONES	48



3.2 ANÁLISIS HIDROMETEOLÓGICO.....	51
3.3 TRANSPOSICIÓN DE CAUDALES.....	53
3.4 BALANCE HÍDRICO.....	54
3.4.1 MÉTODO DE THORNTHWAITE	54
3.4.2 MÉTODO DE PENMAN-MONTEITH	56
3.4.3 MÉTODO DE BLANEY CRIDDLE	59
3.5 ANÁLISIS DE PRECIPITACIÓN	61
3.6 CAMPAÑA DE AFOROS.....	63
3.7 DISCUSIÓN DE RESULTADOS MÉTODOS.....	65
3.8 OBRAS HIDRÁULICAS	66
3.8.1 DISEÑO DE VERTEDEROS	67
CONCLUSIONES.....	68
BIBLIOGRAFÍA.....	71
ANEXOS	74
Anexo 1. Evolución del macrodeslizamiento.....	74
Anexo 2. Ficha técnica Método de Campo.....	76
Anexo 3. Métodos para la determinación de caudales.....	77
Anexo 4. Clasificación de cuenca y relieve	81
Anexo 5. Presión y constante psicrométrica según altitud.	82
Anexo 6. Valores del coeficiente global y coeficiente del tipo de cultivo	84
Anexo 7. Ficha técnica para el registro de aforos de caudal.....	87
Anexo 8. Mapa de levantamiento de puntos de influencia en el macrodeslizamiento.	88
Anexo 9. Análisis de correlación entre métodos de evapotranspiración y precipitación.	93



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Quebradas involucradas en el macrodeslizamiento.	17
Figura 2. Área del macrodeslizamiento de Llamacón.....	19
Figura 3. Mapa del régimen térmico del Ecuador.....	25
Figura 4. Mapa estaciones meteorológicas e hidrológicas usadas.....	26
Figura 5. Análisis de correlación de la precipitación entre la estación de Palmas y Collay	28
Figura 6. Diagrama de la radiación entrante y saliente de la superficie terrestre.....	34
Figura 7. Molinete Price	41
Figura 8. Esquema de vertedero rectangular.	45
Figura 9. Interpretación de las zonas del diagrama de caja con respecto a la serie histórica.	47
Figura 10. Mapa de delimitación inicial y final.	49
Figura 11. Mapa de la delimitación final (99ha) y delimitación de CELEC (86ha).....	50
Figura 12. Régimen de precipitaciones de Llamacón.....	51
Figura 13. Velocidad del viento mensual en Llamacón	52
Figura 14. Régimen de Temperatura de Llamacón	52
Figura 15. Diagrama de caja transposición de caudales QA.....	54
Figura 16. Diagrama de caja transposición de caudales QB.....	54
Figura 17. Diagrama de caja Thornthwaite QA.	55
Figura 18. Diagrama de caja Thornthwaite QB.	56
Figura 19. Diagrama de caja Penman-Monteith QA.....	58
Figura 20. Diagrama de caja Penman-Monteith QB.....	58
Figura 21. Mapa usos de suelo en las cuencas de las quebradas	59
Figura 22. Diagrama de caja Blaney Criddle QA.....	60
Figura 23. Diagrama de caja Blaney Criddle QB.....	61
Figura 24. Variabilidad de precipitaciones.....	62
Figura 25. Diagrama de caja de la serie histórica de precipitación.....	63
Figura 26. Puntos de aforo	64
Figura 27. Resultados obtenidos en la quebrada “A”	65
Figura 28. Resultados obtenidos en la quebrada “B”	66
Figura 29. Esquema del diseño de vertederos para QA y QB.	67



Figura 30. Área de deslizamiento según año	74
Figura 31. Tasa de incremento del área del deslizamiento por año	75
Figura 32. Mapa levantamiento geológico.....	88
Figura 33. Análisis de correlación entre precipitación y lámina escurrida (Penman-Monteith):.....	93
Figura 34. Análisis de correlación entre precipitación y lámina escurrida (Thornthwaite).....	94
Figura 35. Análisis de correlación entre precipitación y lámina escurrida (Blaney Criddle)	94



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de Deslizamiento (Cees van Westen, UNESCO RAPCA)	22
Tabla 2. Valores de diagrama de caja con transposición de caudales	53
Tabla 3. Valores de diagrama de caja con Thornthwaite.....	55
Tabla 4. Valores por altitud para Penman-Monteith	56
Tabla 5. Constantes Método Penman-Monteith	57
Tabla 6. Valores del diagrama de caja con Penman-Monteith	57
Tabla 7. Porcentaje de cobertura vegetal para cada cuenca.....	59
Tabla 8. Valores del diagrama de caja con Blaney Criddle	60
Tabla 9. Valores del diagrama de caja para precipitación	62
Tabla 10. Aforos en las quebradas de Llamacón	64
Tabla 11. Diseño Vertederos	67
Tabla 12. Área afectada en años donde se han hecho control del macrodeslizamiento.	74
Tabla 13. Tasa de aceleración del incremento del área deslizable en el macrodeslizamiento entre el período de 1984 y 2016.	74
Tabla 14. Caudales Río Collay	77
Tabla 15. Serie de caudales generada con Trasposición de Caudales	78
Tabla 16. Serie de caudales generada con Penman-Monteith	79
Tabla 17. Serie de caudales generada con Thornthwaite	79
Tabla 18. Serie de caudales generados con Blaney Criddle	80
Tabla 19. Clasificación de las cuencas por su tamaño según Centro Interamericano de Desarrollo Integral de Aguas y Suelos citado por Aguirre (2007).	81
Tabla 20. Caracterización de Heras del relieve según la pendiente	81
Tabla 21. Presión atmosférica (P) para diferentes altitudes (z)	82
Tabla 22. Constante psicrométrica (γ) para diferentes altitudes (z).....	83
Tabla 23. Coeficientes Globales de usos consuntivos (Kg) para diferentes cultivos. ..	84
Tabla 24. Coeficientes de cultivo (Kc) para cultivos perennes.	85
Tabla 25. Fotografías del macrodeslizamiento.....	89



Universidad de Cuenca
Clausula de propiedad intelectual

Yo, Paula Katherine Gutiérrez Neira, autora del Trabajo de Titulación “CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA DEL MACRO DESLIZAMIENTO DE LLAMACÓN”, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autora.

Cuenca, 03 de abril de 2017

Paula Katherine Gutiérrez Neira

C.I: 0302041561



Universidad de Cuenca
Clausula de propiedad intelectual

Yo, Pedro Javier Sánchez León, autor del Trabajo de Titulación “CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA DEL MACRO DESLIZAMIENTO DE LLAMACÓN”, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 03 de abril de 2017

Pedro Javier Sánchez León

C.I: 0104993969



Universidad de Cuenca
Clausula de derechos de autor

Yo, Paula Katherine Gutiérrez Neira, autora del Trabajo de Titulación "CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA DEL MACRO DESLIZAMIENTO DE LLAMACÓN", reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de Ingeniera Civil. El uso que la Universidad de Cuenca hiciere de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autora.

Cuenca, 03 de abril de 2017

Paula Katherine Gutiérrez Neira

C.I: 0302041561



Universidad de Cuenca
Clausula de derechos de autor

Yo, Pedro Javier Sánchez León, autor del Trabajo de Titulación “CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA DEL MACRO DESLIZAMIENTO DE LLAMACÓN”, reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de Ingeniero Civil. El uso que la Universidad de Cuenca hiciere de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor.

Cuenca, 03 de abril de 2017

Pedro Javier Sánchez León

C.I: 0104993969



AGRADECIMIENTOS

A nuestro tutor, el ingeniero Pablo Guzmán Cárdenas por su gran ayuda y colaboración en cada momento de consulta y soporte en este trabajo de titulación.

A nuestro profesor, el ingeniero Cristian Coello por estar dispuesto en todo momento para aclarar nuestras dudas.

Al ingeniero David Vásquez y a todo el equipo de CELEC EP, que nos brindaron toda la ayuda y facilidades que hicieron posible la realización de nuestro trabajo de titulación.

A nuestras familias sobre todo a nuestros padres quienes a lo largo de toda nuestras vidas nos han apoyado y motivado en nuestra formación académica, creyeron en nosotros en todo momento y no dudaron de nuestras habilidades.

A nuestros profesores a quienes les debemos gran parte de nuestros conocimientos, gracias a su paciencia y enseñanza.

A nuestros familiares y amigos que siempre están para ayudarnos y brindarnos apoyo cuando más lo necesitamos.



CAPÍTULO I GENERALIDADES

1.1 INTRODUCCIÓN

Los deslizamientos son movimientos ladera abajo de una masa de suelo o roca cuyo desplazamiento ocurre predominantemente a lo largo de una superficie de falla, o de una delgada zona en donde ocurre una gran deformación cortante. (*Servicio Nacional de Geología y Minería. 2007., Publicación Geológica Multinacional N°4*). Al ser un proceso muy destructivo que causa daños irreversibles es importante tener un conocimiento profundo de las causas de los deslizamientos y el estado en el que se encuentra determinado talud o zona inestable a fin de que pueda ser estabilizada y/o manejada.

Históricamente el macrodeslizamiento más significativo en Ecuador es “La Josefina” ubicado a 22 km de la ciudad de Cuenca, ocurrido en la margen izquierda del río Paute, el 29 de marzo de 1993, donde cerca de 20 millones de metros cúbicos de tierra (*Plaza & Egüez, 1993*) se deslizaron del cerro Tamuga, dejando a su paso cerca de 100 pérdidas humanas, provocando el embalsamiento de los ríos Paute y Jadán e inundando aguas arriba un área aproximada de 1000 ha (*Abril & Knight, 2004*). A fin de evitar una inundación mayor se abrió un canal de 18 m de profundidad en la cresta del dique, lo que provocó el desagüe del embalse. El desfogue provocó una onda de creciente con un pico calculado de 8300 m³/s (*Abril & Knight, 2004*), el cual arrastró alrededor de 10 millones de metros cúbicos de material; provocando la inundación aguas abajo e innumerables afecciones al pueblo de Paute y sus alrededores.

En marzo del 2005, se inicia la construcción del proyecto hidroeléctrico Mazar, ubicado en las inmediaciones de la desembocadura del río Mazar. Está constituido por una presa de enrocado con pantalla de hormigón de 166 m de altura, la cual forma un embalse de 394 hm³ de volumen total y una central subterránea a pie de presa, con dos turbinas tipo Francis de 85 MW cada una, y que han generado energía desde diciembre de 2010; aportando con aproximadamente 800 GWh/año al Sistema Nacional Interconectado (SNI). La característica principal de Mazar es su gran embalse que permite una mayor regulación del caudal del río Paute, incrementando la energía firme en las centrales Molino y Sopladora, y además, reteniendo los materiales sólidos que arrastra el río, contribuyendo a la continuidad operativa del embalse de Amaluza. (CELEC EP).

Los factores que posiblemente influyen en el constante movimiento del talud que conforma el macrodeslizamiento de Llamacón son tanto de origen natural como humano. Los naturales están relacionados con la geología y morfología, los humanos



están relacionados con cambios de uso del suelo por las actividades humanas como la agricultura, y las infraestructuras de drenaje en mal estado que alteran el flujo natural del agua promueven la infiltración de agua, es importante recalcar también que la cercanía al embalse Mazar que puede acelerar la degradación de los suelos y los procesos vinculados al movimiento de masas por la interacción entre el nivel del embalse y el nivel freático de los taludes.

Por el momento las medidas para vigilar el macrodeslizamiento se mantienen en el monitoreo por una red de puntos de control topográfico/geodésico que permiten corroborar el movimiento. Por lo descrito es fundamental una caracterización hidrológica para conocer la dinámica y los procesos hidrológicos como la influencia de la lluvia en la recarga, la escorrentía, y el almacenamiento. Al analizar estos resultados se puede visualizar su influencia dentro del macrodeslizamiento a fin de optimizar las acciones de manejo a corto, mediano y largo plazo.

La importancia de realizar este trabajo de titulación radica en que en la zona de Llamacón podría generarse una catástrofe, con la posibilidad de efectos sinérgicos o en cadena que al deslizarse puedan golpear la base del talud de Chalacay ubicado en el lado opuesto el cual también tiene problemas de estabilidad; por otra parte la ola que se provoque por dicho movimiento dependerá del volumen del material, la cota del embalse y la velocidad del movimiento, comprometiendo la integridad de las estructuras o los taludes aguas abajo afectando a la generación de energía del país.



1.2 OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Realizar la caracterización hidrológica del macrodeslizamiento de Llamacón para obtener información hidrológica que servirá para determinar la influencia del agua en la masa deslizable de la zona.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Delimitar el macrodeslizamiento;
2. Mapear grietas, fisuras y drenaje superficial de la zona;
3. Generar información hidrológica y meteorológica de la zona;
4. Determinar puntos de aforos de la zona del macrodeslizamiento;
5. Obtener información hidrológica del sector mediante aforos para analizar la influencia del agua en el macrodeslizamiento.

1.3 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

Llamacón ubicado en la parroquia Guarainag, cantón Paute, provincia del Azuay con coordenadas UTM: 763663 E, 9702906 N, 2300 msnm, con un clima templado con una temperatura promedio de 14°C, se encuentra ubicada a la orilla del embalse Mazar al frente de la quebrada de Chalacay. El sector presenta notorios movimientos de suelo y una serie grietas.

La zona del macrodeslizamiento está influenciada por las quebradas “A” y “B” *Figura 1*, para esto se delimitaron las cuencas de las quebradas involucradas para realizar un análisis hidrológico en donde se determinará si existe o no una posible influencia del agua en la aceleración del macrodeslizamiento.

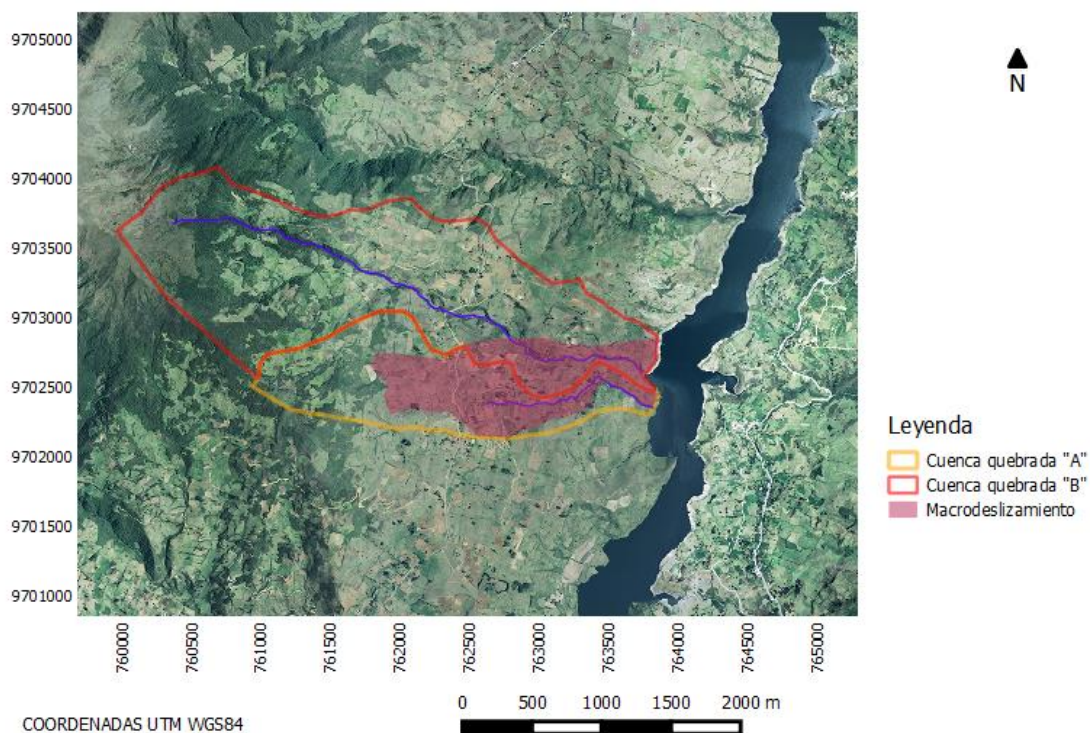


Figura 1. Quebradas involucradas en el macrodeslizamiento.

ESTUDIOS ANTERIORES.

En el año del 1984, personal técnico de INECCEL, califican al deslizamiento de Llamacón como de riesgo inmediato a deslizarse, dimensionando con un área de 13,2 ha cuyo volumen calculado de masa inestable fue de 987750 metros cúbicos.



En el 2007, personal del Consorcio Gerencia Mazar dimensionan a este deslizamiento, determinando que posee una superficie de 25 ha aproximadamente. Mediante la ejecución de algunas pruebas establecieron que el factor de seguridad dinámico que presentaba ese deslizamiento en ese tiempo era de 1,064. El factor de seguridad dinámico que se determinó está en función del factor estático (relación de fuerzas estabilizadoras sobre fuerzas desestabilizadoras), pero este además considera cargas sísmicas. (*Corporación Eléctrica del Ecuador, 2014., Informe Técnico de Llamacón N°1*).

En el informe anual, realizado por el personal de monitoreo de la Corporación Eléctrica del Ecuador CELEC E.P. - Unidad de Negocio HIDROPAUTE, en el año 2012, se hace constar que este deslizamiento posee un área de 35 ha.

En el informe realizado el mes de Agosto del 2014, por el personal de monitoreo de la Corporación Eléctrica del Ecuador CELEC E.P. – Unidad de Negocio HIDROPAUTE, se determinó que este cuerpo inestable tiene un área de 86.06 ha, aproximadamente. (Evolución del macrodeslizamiento – *Anexo 1*)

El área del macrodeslizamiento de Llamacón se encuentra en el margen del Rio Paute frente a la desembocadura de la quebrada de Chalacay, a 11km aguas arriba de la presa Mazar, está cubierta en su mayoría por pastizales, y pocos sembríos de maíz, también cuenta con pocas viviendas desocupadas en la parte alta, cerca de la vía principal a Guarainag. Geográficamente, al Norte de Llamacón se sitúa la Quebrada Dagñal; al Este el embalse Mazar y la población de Chalacay, y al Oeste está la población de Llamacón.

Mediante estudios geotécnicos realizados por CELEC EP desde el 2007, se determinó que la profundidad del deslizamiento está limitada al contacto de capas coluvial/roca máximo de 25m, también se indica que al ser una zona de intensidad sísmica relativamente alta, un fuerte movimiento sísmico provocaría un desprendimiento masivo del deslizamiento que produciría un oleaje que alcanzaría la presa pero no rebasaría la corona de esta. (*Corporación Eléctrica del Ecuador, 2014., Informe Técnico de Llamacón N°1*)

CONTROL DEL MACRODESIZAMIENTO DE LLAMACÓN

El control del macrodeslizamiento de Llamacón se inició en la fase de llenado del embalse de Mazar por parte de CELEC EP, intensificándose en octubre del 2011 cuando se detectaron grietas y fisuras en la zona. Con el control continuo se ha podido obtener velocidades de asentamientos, desplazamientos, que han podido determinar la magnitud del macrodeslizamiento. (*Corporación Eléctrica del Ecuador, 2014., Informe Técnico de Llamacón N°1*)

Para control topográfico del macrodeslizamiento se han colocado 15 pilas topográficas en la parte baja *Figura 2*, las cuales son monitoreadas para la obtención de datos y proceso de información sobre los asentamientos y desplazamientos de tierra en la zona. Esta información se ha presentado mediante informes técnicos anuales a cargo del equipo de monitoreo geológico de la Unidad de Negocio Hidropaute de CELEC EP.

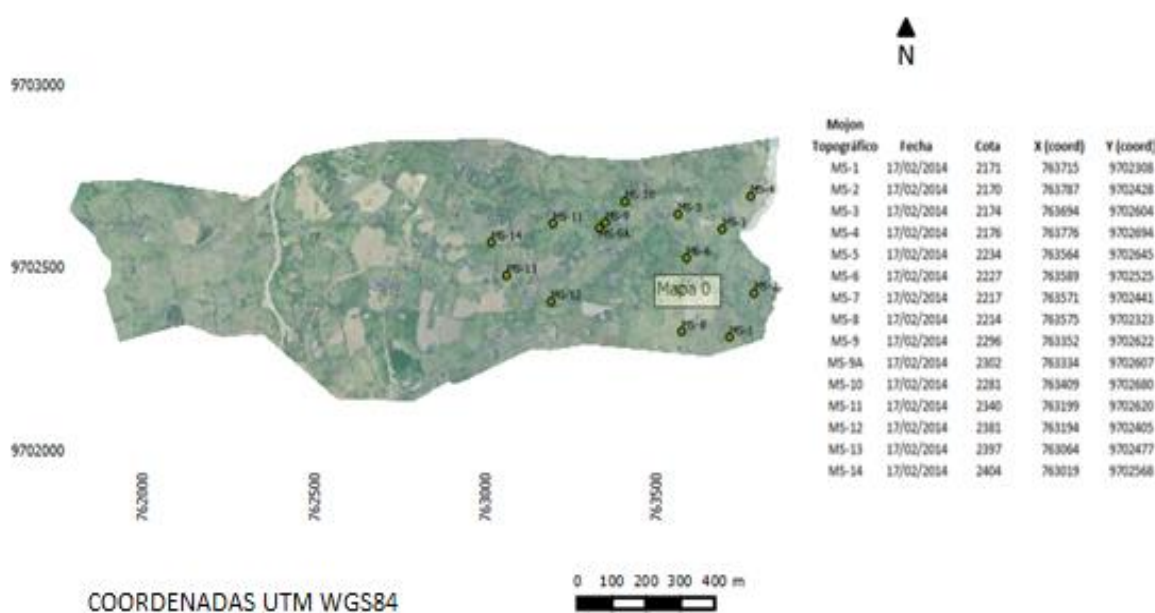


Figura 2. Área del macrodeslizamiento de Llamacón: Disposición de pilas Topográficas para control geodésico

En el informe realizado por el personal de monitoreo geológico en agosto del 2014, se expresa que este es un deslizamiento compuesto por roca totalmente meteorizada, flujos de lodo y coluviales, lo cual significa que es un deslizamiento complejo tanto en su composición como en el comportamiento de su desplazamiento.



1.4 CARACTERÍSTICAS DE LAS CUENCAS EN TORNO AL ANÁLISIS DE INFILTRACIÓN DE CAUDALES

En el presente estudio se utiliza los métodos de Penman-Monteith, Thornthwaite y Blaney Criddle para el cálculo de la evapotranspiración mensual, la misma que será usada en la *Ecuación 5* junto con los datos de precipitación mensuales, con el fin de generar una serie de caudales mensuales para las quebradas que se encuentran en el macrodeslizamiento. Esta serie de caudales será usada para comparar con el caudal aforado de septiembre del 2016, con el fin de ver la existencia de una posible infiltración de agua en la zona afectada.

Características de la cuenca:

Existen varios factores que afectan la escorrentía superficial, estos factores pueden ser meteorológicos y físicos, los meteorológicos están relacionados con: tipo de precipitación (agua, nieve, agua – nieve), intensidad, cantidad y duración de la lluvia, distribución de la misma a lo largo de la cuenca, humedad del suelo y evapotranspiración. Los físicos están relacionados con: usos del suelo, vegetación, tipo del suelo, pendiente, topografía y masas de agua que alteren el flujo del agua. [*Glosario - Servicio Geológico de los Estados Unidos*]

La escorrentía superficial no solo se depende de la intensidad, cantidad y duración de la lluvia, sino del tipo y la humedad previa del suelo también, el suelo del macrodeslizamiento se clasifica como “Udic Vertic Tropustalf” un suelo arcilloso (<0.002mm) mezclado con montmorillonita y caolinita, al ser un suelo arcilloso se reduce la tasa de infiltración mientras más intensa y duradera sea la precipitación. (FAO 1991 *Water Harvesting*). El régimen de humedad del suelo es údico – ústico, éste régimen es común en los suelos de climas húmedos que tienen una precipitación bien distribuida a lo largo del año; tienen suficiente lluvia en verano, para que la cantidad de agua almacenada más la lluvia sea aproximadamente igual o exceda a la cantidad de evapotranspiración (no existe estrés hídrico), (Soil Survey Staff, 1999 *Natural Resources Conservation Service N°436*), durante los controles topográficos a lo largo del año y durante el levantamiento de información geológica se pudo observar que en grandes extensiones de área el suelo están saturadas, con varios afloramientos de agua y cambios de vegetación como se muestra en la *Figura 32*, en nuestro caso de estudio el tipo y la humedad del suelo reduce la infiltración de agua.

La cantidad de agua que almacena la vegetación está directamente relacionada con la altura y el diámetro de la misma (Nagase 2012), la cobertura vegetal de la zona cubierta



predominantemente por pastos (3cm - 6cm), los cuales se usan para actividades de ganadería extensiva, esto tiene dos efectos, primero el de la compactación de los suelos, lo que reduce la infiltración del suelo (la ganadería extensiva puede reducir la conductividad hidráulica del suelo cerca del 80% (*J. Chyba et al.*), y segundo el de mantener una altura y el diámetro bajo del pasto, lo que evita grandes acumulaciones de agua en la vegetación, y genera mayor escorrentía superficial.

La zona de estudio con una pendiente promedio del -20.26% en dirección del embalse se considera un terreno accidentado según la clasificación de Heras, las zonas de estudio con un área de 139ha y 327ha son considerada como microcuencas (<10000ha) (*Aguirre 2007*). Por lo esto provoca que gran parte de la precipitación en la microcuenca será descargada instantáneamente al embalse.

Para realizar éste análisis de infiltración de caudales con los métodos de evapotranspiración se asume que la infiltración es nula por las características de la cuenca descritas anteriormente y para facilitar los cálculos de este trabajo de titulación. Cabe recalcar que en toda cuenca existe un porcentaje de infiltración ya sea éste mínimo.

También se realizará el mismo análisis con el método de transposición de caudales con el fin de validar la ecuación del balance hídrico para analizar infiltración de caudales, ya que éste al ser un método de correlación entre cuencas, no es necesario que las cuencas tengan que cumplir condiciones y características específicas.



CAPÍTULO 2 MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 DELIMITACIÓN DEL MACRODESGLIZAMIENTO

El mapeo del macrodeslizamiento tiene como objetivo georreferenciar todos los puntos de interés como ojos de agua, cambios de vegetación, grietas que ayudan a delimitar toda la zona que está afectada y la cual está en constante movimiento, dando a conocer el área y la evolución de la misma a lo largo de distintos controles. La delimitación final se obtuvo mediante el método de campo aplicado a la delimitación inicial del método digital.

2.1.1 MÉTODO DIGITAL (GIS) ANÁLISIS DE MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES

El programa que se utilizó para analizar las imágenes satelitales y los puntos georreferenciados es QGIS 2.2.0 (software libre) y ArcGIS 10.1. Las imágenes satelitales (resolución 1:11) y los archivos SHP de curvas de nivel, ríos, quebradas, acequias, vías, entre otros de la cuenca del Paute fueron facilitados por CELEC EP. La interpretación de fotografías aéreas para la clasificación de deslizamientos la cual se basa en el análisis de vegetación, condiciones morfológicas y condiciones de drenaje debido a la pendiente. El tipo y subtipo del deslizamiento está relacionado con las características morfológicas, La actividad en un deslizamiento se puede determinar observando discontinuidades existentes en la vegetación, mientras que una vegetación densa podría indicar que el deslizamiento es estable, la actividad del deslizamiento también puede observarse gracias a las condiciones de drenaje de la zona. Cees van Westen sugiere que la práctica de fotointerpretación se debe hacer utilizando una clasificación simple *Tabla 1:*

Tabla 1. Clasificación de Deslizamiento (Cees van Westen, UNESCO RAPCA)

	Tipo	Subtipo	Actividad	Vegetación	Cuerpo
1	Caída	Rotacional	Estable	Descubierto	Cicatriz del deslizamiento
2	Derrumbe	Translacional		Baja	
3	Deslizamiento	Complejo	Activo	Alta	Cuerpo de salida
4	Caída lateral	Desconocido			
5	Flujo				
6	Avalancha de derbis				



La clasificación de la zona con la *Tabla 1*, se facilita pues se dispone de fotografías aéreas de varios años (la zona es considerada deslizamiento desde el año 1984 y en el 2014 mediante el control topográfico se determina que es un deslizamiento compuesto (*Corporación Eléctrica del Ecuador, 2014., Informe Técnico de Llamacón N°1*), por lo que en las fotografías aéreas se podrá buscar la evolución del deslizamiento, así como cambios de vegetación y cicatrices que ayuden a delimitarlo.

2.1.2 MÉTODO DE CAMPO

Mediante una visita a la zona del macrodeslizamiento (guiada por el personal de CELEC EP), se observó de manera general el estado del macrodeslizamiento, realizándose una evaluación de puntos geológicos importantes, así como de daños a las viviendas del sector.

Con esta primera información se procedió a realizar un modelo de ficha técnica (*Anexo 2*) para facilitar la toma de datos con equipo GPS, para el procesamiento y un posterior análisis de los mismos. Para el procesamiento de datos primero se georreferenció grietas, fisuras, cambios de vegetación, ojos de agua, afloramientos de agua, y la corona del deslizamiento etc. sobre la imagen satelital; así, con la topografía del terreno se delimita el macrodeslizamiento.



2.2 ANÁLISIS HIDROMETEOROLÓGICO

CARACTERIZACIÓN DEL RÉGIMEN CLIMÁTICO

PRECIPITACIÓN Se caracteriza el régimen precipitación para conocer los meses donde posiblemente exista mayor influencia del agua en el macrodeslizamiento. El régimen se obtuvo procesando los registros del INAHMI de 17 años entre 1998-2014 de la estación Palmas. La cual se encuentra a una distancia en línea recta de 3123m de la quebrada “A” y 3870m de la quebrada “B”.

El macrodeslizamiento se encuentra en una zona de transición entre el trópico fresco y trópico moderadamente fresco (*Gerd Dercon et al. 1998*), Tanto el trópico fresco y el trópico moderadamente fresco están influenciados fuertemente por el régimen de humedad del Oriente, para el trópico moderadamente fresco el período húmedo puede ser de 7 a 12 meses, mientras que para el trópico fresco puede ser de 5 a 12 meses, la zona de estudio se encuentra en el régimen **Pluvial persistente muy Húmedo de la Región Amazónica**, en éste régimen las lluvias están bien distribuidas a todo lo largo del año, salvo una ligera disminución de diciembre a febrero.

VELOCIDAD DE VIENTO Es un factor importante para el cálculo de la evapotranspiración con el método de Penman-Monteith, la evapotranspiración influye en la cantidad de precipitación que pasa a ser escorrentía superficial. El viento influye en el proceso de formación de nubes y por ende en la precipitación, para esto se caracterizó los vientos mensualmente con sus promedios de los registros del INAHMI de 17 años entre 1998-2014 de la estación Palmas, ya que estos también tienen una correlación con la época lluviosa y época seca de la zona.

TEMPERATURA Se caracteriza el régimen térmico para conocer su comportamiento en el macrodeslizamiento La variación de temperatura anual media, máxima y mínima, se obtuvo con el registro del INAHMI de 17 años entre 1998-2014 de la estación Palmas. La temperatura depende fundamentalmente de la ubicación respecto del Ecuador y sus zonas tropicales, en el ecuador se distingue 5 regímenes térmicos, el macrodeslizamiento se encuentra en una zona de transición entre el régimen mesotérmico templado cálido y mesotérmico templado frío como se muestra en la *Figura 3. (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. 2006., Climas del Ecuador)*

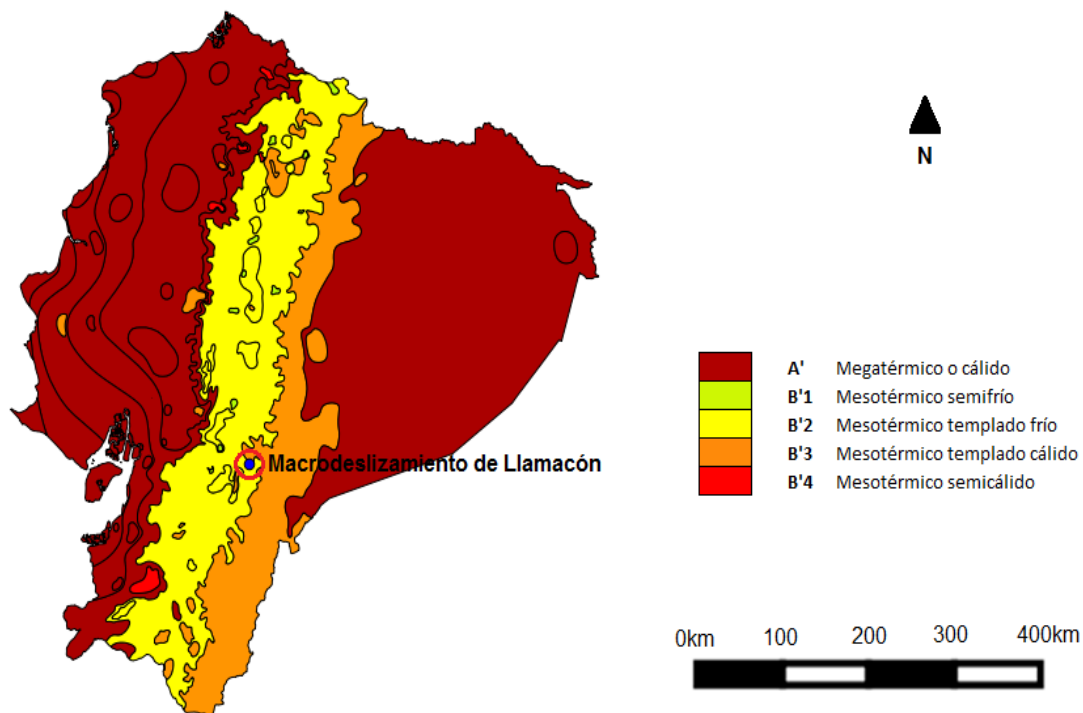


Figura 3 Mapa del régimen térmico del Ecuador: Las cuencas de las quebradas se encuentran en una zona de transición térmica entre el régimen mesotérmico templado cálido y el mesotérmico templado frío.

2.3 TRANSPOSICIÓN DE CAUDALES

El método de la transposición de caudales es usado para generar una serie histórica de caudales en una zona de estudio utilizando información de una cuenca similar. Éste método se realizó con el propósito de utilizar un método estadístico (correlación) para validar los métodos de evapotranspiración en el análisis de infiltración de caudales.

Los datos usados para la trasposición de caudales corresponden al río Collay Anexo 3, Para el análisis de correlación de precipitación se utilizó datos de las estaciones Paute, Gualaceo, Sevilla de Oro, Sigsig y Palmas, en donde la precipitación en Palmas, representa la precipitación en las cuencas involucradas en el macrodeslizamiento, debido a que es la estación más cercana al macrodeslizamiento. *Figura 4.*

Estaciones meteorológicas e hidrológicas usadas:

	Estación Meteorológica				Estación Hidrológica	
	Paute	Sigsig	Palmas	Sevilla de Oro	Gualaceo	Collay AJ
N (m)	9690276	9662811	9699527	760920	9681215	9697133
E (m)	748715	746065	763533	9690529	747184	762014
Cota (msnm)	2194	2600	2400	2360	2230	2190

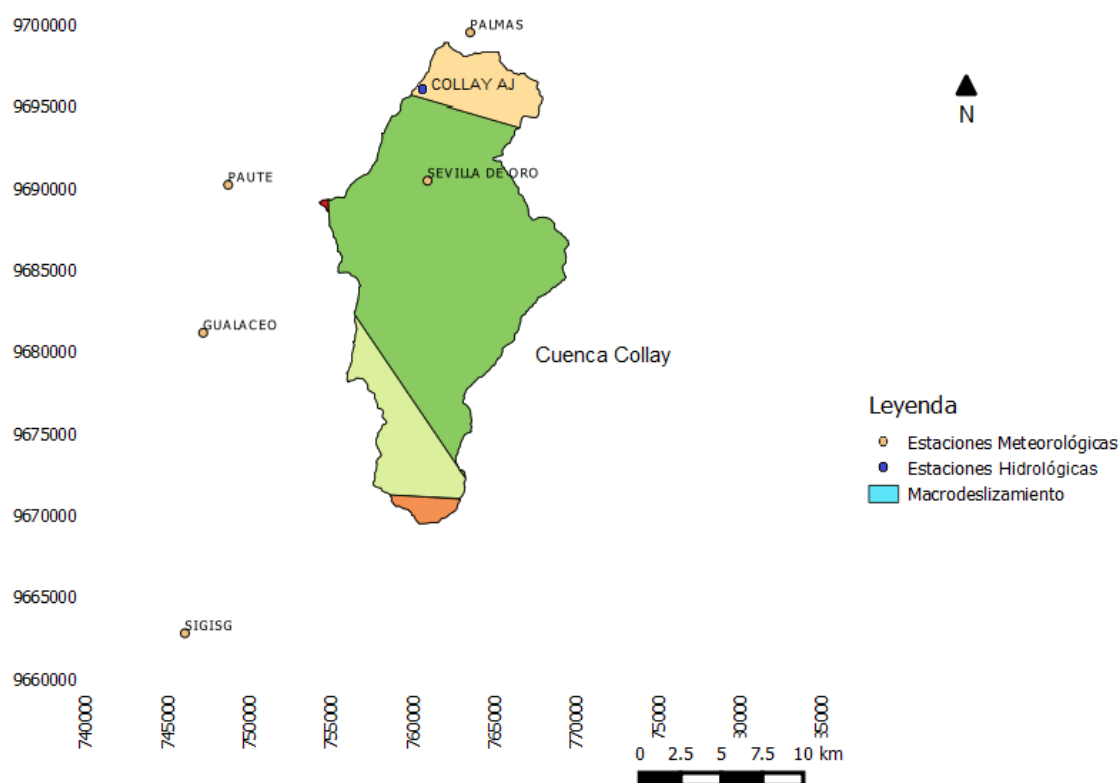


Figura 4 Mapa estaciones meteorológicas e hidrológicas usadas.

La transposición de caudales consiste en hallar un coeficiente que permita llevar la información de caudales hasta el lugar deseado, considerando la similitud de las cuencas, de forma general la ecuación se expresa *Ecuación 1* (Ortiz 2011):

$$Q_A = \frac{A_A}{A_C} \left(\frac{P_A - E_A}{P_C - E_C} \right) Q_C \quad \text{Ec. 1}$$

Donde:

Q_A y Q_C : Caudal quebrada "A" y caudal río Collay



A_A y A_C : Área de la cuenca de la quebrada "A" y área cuenca Collay

P_A y P_C : Precipitación quebrada A y precipitación Collay

E_A y E_C : Evapotranspiración en la cuenca "A" y evapotranspiración Collay

Se puede eliminar el criterio de la evapotranspiración en la *Ecuación 1*, siempre y cuando la cobertura vegetal de ambas cuencas sea similar. En el caso de las cuencas de las quebradas y la cuenca del río Collay se observa que los suelos están ocupados predominantemente por pasto, vegetación leñosa y cultivos. Obteniendo la *Ecuación 2*:

$$Q_A = \frac{A_A}{A_C} \left(\frac{P_A}{P_C} \right) Q_C \quad \text{Ec. 2}$$

Para obtener P_A/P_C en la *Ecuación 2*, se determinó el régimen de precipitación de la cuenca del río Collay y el régimen de precipitación de las cuencas involucradas en el macrodeslizamiento, la relación entre regímenes se representa como el factor "n" *Ecuación 3* que expresa la cantidad de precipitación del macrodeslizamiento con respecto a Collay en el mismo período de tiempo. Para determinar las precipitaciones de la cuenca del río Collay, se realizó el método de polígonos de Thiessen con las estaciones de Palmas, Sevilla de Oro, Paute, Gualaceo y Sigisig (*Figura 4*), mientras que para la precipitación de las cuencas involucradas en el macrodeslizamiento se tomaron las lluvias de Palmas, la cual es la estación meteorológica más cercana al macrodeslizamiento.

$$\frac{Q_A}{Q_C} = \left(\frac{A_A}{A_C} \right) n \quad \text{Ec. 3}$$

Se realiza una correlación entre los regímenes de precipitaciones, para validar la correlación se determina el coeficiente de correlación de Pearson, cuando éste es mayor a 0.9 significa que ambas estaciones tienen una correlación positiva muy alta, aunque se puede aceptar un coeficiente de correlación $R > 0.75$ como aceptable, esto quiere decir que la precipitación entre las estaciones tiene una semejanza temporal y espacial.

El valor “n” es igual a la pendiente de la recta interpolada de la gráfica, la pendiente de la recta en la correlación representa la cantidad de lluvia de Palmas con respecto a Collay. Esto quiere decir que si $n > 1$ llueve más en Palmas que en Collay, si $n < 1$ sucede lo contrario. En el análisis se obtuvo un $n = 1.3$, lo que quiere decir que la precipitación es semejante entre Palmas y Collay. Para este análisis se calculó los regímenes de las cuencas del período de 2009 a 2012. (Anexo 3)

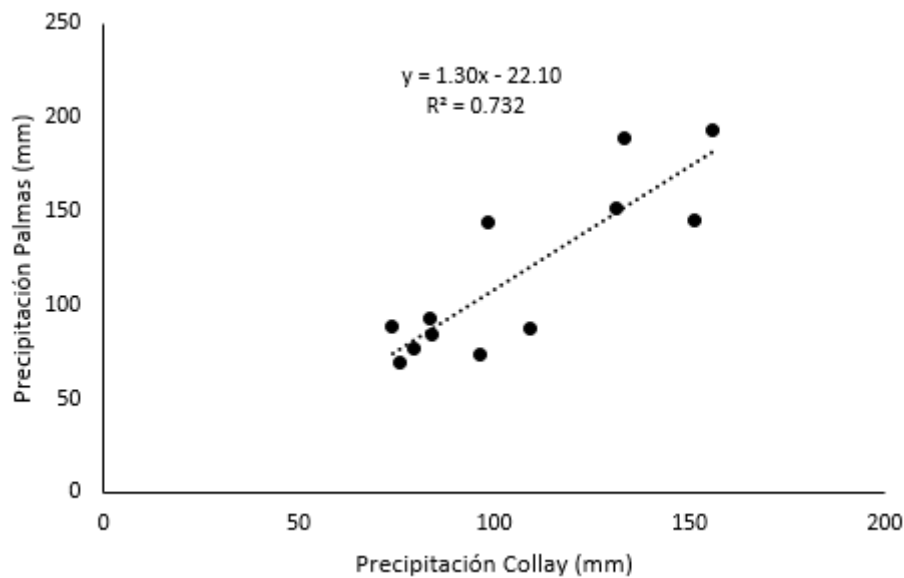


Figura 5. Análisis de correlación de la precipitación entre la estación de Palmas y Collay: con un factor R de 0.86, lo que sugiere una buena correlación entre ambas estaciones, con una relación de precipitaciones $n=1.30$



2.4 ECUACIÓN DEL BALANCE HÍDRICO

La ecuación del balance hídrico general expresa que todas las entradas, salidas y la variación de volumen de una zona deben ser igual a 0. Se expresa mediante la *Ecuación 4*:

$$E - S - \Delta S = 0 \quad \text{Ec. 4}$$

Donde:

E: Entradas (mm)

S: Salidas (mm)

ΔS : Cambio de volumen de la zona de análisis (mm)

En general, las entradas de la *Ecuación 4* del balance hídrico comprenden la precipitación (P) recibida por la superficie del suelo, y las aguas superficiales y subterráneas recibidas por la cuenca (Q_{se} y Q_{sube}). Las salidas en la ecuación incluyen la evaporación desde la superficie de la cuenca (E) y la salida de corrientes de agua superficial y subterránea desde la cuenca o masa de agua considerada (Q_{ss} y Q_{sus}). Cuando las entradas superan a las salidas el volumen de agua almacenada aumenta y cuando ocurre lo contrario disminuye, a esta diferencia de almacenamiento en el sistema se denomina (ΔS). *Ecuación 5*.

$$P + Q_{se} + Q_{sube} - E - Q_{ss} - Q_{sus} - \Delta S = 0 \quad \text{Ec. 5}$$

Las cuencas no reciben aguas superficiales por parte de otras cuencas por lo que $Q_{se} = 0$, la entrada y salida por parte de aguas subterráneas para un suelo arcilloso se pueden considerar como no relevantes en la ecuación del balance hídrico, por lo que se considera $Q_{sus} = 0$ y $Q_{sube} = 0$. *Ecuación 6*.

$$P - E = Q_{ss} + \Delta S \quad \text{Ec. 6}$$

En una cuenca pequeña con las características que tiene nuestra zona de estudio (tipo de suelo, cobertura vegetal, etc.) Con grandes entradas y salidas de flujo se podría



considerar $\Delta S = 0$. En el levantamiento geológico se observa que las cuencas de estudio tienen grietas y fisuras (*Figura 32.*) provocadas por el macrodeslizamiento, esto podría causar que el cambio del volumen de agua en la cuenca sea significativo. Sin embargo para comprobar éste cambio del volumen de agua se determinara el **Caudal Esperado** en la cuenca, el mismo que será igual al caudal superficial de salida Q_{ss} y el cambio de volumen de agua por la infiltración ΔS . *Ecuación 7*

$$P - E = Q_E \quad \text{Ec. 7}$$

Con los valores de evapotranspiración y precipitación mensuales, se calcula el caudal esperado en la cuenca. En este caso se puede aplicar la ecuación del balance hídrico para el cálculo de lámina escurrida mensual debido a las condiciones mencionadas en el *Análisis de Infiltración en el capítulo 2.*

2.4.1 CORRECCIÓN DE TEMPERATURA DEL MACRODESILIZAMIENTO

Se tuvo que realizar una corrección de temperatura debido a la variación de la altitud media de cada cuenca por la existencia de un gradiente térmico en la atmósfera terrestre, con la temperatura corregida los datos obtenidos a partir de la temperatura serían validados para el estudio del macrodeslizamiento. Los datos de temperatura usados corresponden a la estación hidrometeorológica de Palmas.

La altitud media de las cuencas sobre el nivel del mar de las quebradas existentes en el deslizamiento se calcula con la delimitación de las cuencas generado por la herramienta *FlowDirection* de ARCGIS y con un modelo digital de elevaciones creado con las curvas de nivel de la zona.

La *Ecuación 8* fue utilizada para obtener temperatura según la altitud, se obtuvo del atlas temático de la cuenca del río Paute (*Programa para el Manejo del Agua y del Suelo. 2011., Atlas temático de la cuenca del río Paute*).

$$T = -0.0053h + 27.564 \quad \text{Ec. 8}$$

Donde:

T: Temperatura

h: Altitud



2.4.2 EVAPOTRANSPIRACIÓN CON EL MÉTODO DE PENMAN-MONTEITH

El método FAO Penman-Monteith fue utilizado considerando el concepto de cultivo hipotético (pasto) con una altura de 0.12m y un albedo de 0.23m, este representa la evapotranspiración en una superficie de pasto verde de altura uniforme, creciendo activamente y adecuadamente regado. El concepto de una superficie de referencia fue introducido con el fin de obviar la necesidad de definir los parámetros que intervienen en la evaporación que son únicos para cada cultivo. El método fue desarrollado con la finalidad de incluir los procesos biológicos y físicos implicados en la evaporación.

Los datos utilizados como: temperatura, humedad relativa mínima, humedad relativa máxima y humedad relativa media mensual, precipitación mensual, nubosidad, velocidad del viento medida a 2m desde el suelo; Se tomaron de los anuarios del INAHMI de la estación de Palmas. También se utilizó la información geográfica de la zona

Para aplicar correctamente el método se validó los siguientes términos:

- La presión atmosférica y la constante psicrométrica son variables que dependen de la altitud de la cuenca, para estos valores se usaron las tablas del *Anexo 5*
- El flujo del calor del suelo es la energía que se utiliza para calentar o enfriar el suelo, para evapotranspiraciones mensuales con Penman-Monteith su valor está dado por la *Ecuación 9*.

$$G_{mes i} = 0.07(T_{mes i+1} - T_{mes i-1}) \quad \text{Ec. 9}$$

- La velocidad del viento depende de la morfología de la cuenca y de la temperatura, para usarla en la ecuación de Penman-Monteith esta debe ser medida a 2m del suelo, los datos de velocidad del viento usados para el estudio del macrodeslizamiento fueron de la estación hidrometeorológica de Palmas.

La ecuación usada para calcular la evapotranspiración con el método de Penman-Monteith es la siguiente (FAO 2006., *Riego & Drenaje*):

$$ET_o = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1+0.34u_2)} \quad \text{Ec. 10}$$

Donde:

ET_o : Evapotranspiración de referencia (mm día⁻¹)



R_n : Radiación neta en la superficie de cultivo ($\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$)

R_a : Radiación extraterrestre (mm día^{-1})

G : Flujo de calor del suelo ($\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$)

T : Temperatura media a 2m de la altura del suelo ($^{\circ}\text{C}$)

u_2 : Velocidad del viento a 2m de la altura del suelo (m s^{-1})

e_s : Presión de vapor de saturación (KPa)

e_a : Presión real de vapor (KPa)

$e_s - e_a$: Déficit de presión de vapor (KPa)

Δ : Pendiente de la curva de presión de vapor ($\text{KPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$)

γ : Constante psicrométrica ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$)

Pendiente de la curva de presión de saturación de vapor

Se calcula la pendiente de la curva de presión de saturación de vapor (presión en donde la fase líquida y gaseosa se encuentra en equilibrio). *Ecuación 11*

$$\Delta = \frac{4098 \left(0.6108 \exp \left(\frac{17.27 T}{T+237.3} \right) \right)}{(T+237.3)^2} \quad \text{Ec. 11}$$

Donde:

Δ : Pendiente de la curva de la presión de saturación de vapor a la temperatura del

aire T ($\text{KPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$)

T : Temperatura media del aire del período calculado ($^{\circ}\text{C}$)

Presión de saturación de vapor a la temperatura del aire

$$e^{\circ}(T) = 0.6108 \exp \left(\frac{17.27 T}{T+237.3} \right) \quad \text{Ec. 12}$$



Donde:

$e^{\circ}(T)$: Presión de saturación de vapor a la temperatura del aire, T (KPa)

T : Temperatura de aire a la cual se quiere hallar la presión de saturación ($^{\circ}\text{C}$)

Presión media de vapor de saturación.

$$e_s = \frac{e^{\circ}(T_{max}) + e^{\circ}(T_{min})}{2} \quad \text{Ec. 13}$$

Donde:

e_s : Presión media de vapor de saturación (KPa)

$e^{\circ}(T_{max})$: Presión de saturación de vapor de la temperatura máxima (KPa)

$e^{\circ}(T_{min})$: Presión de saturación de vapor de la temperatura mínima (KPa)

Presión real de vapor.

$$e_a = \frac{e^{\circ}(T_{min})}{100} HR_{max} \quad \text{Ec. 14}$$

Donde:

e_a : Presión real de vapor (KPa)

HR_{max} : Humedad relativa máxima (%)

$e^{\circ}(T_{min})$: Presión de saturación de vapor de la temperatura mínima (KPa)

Cálculo de la Radiación neta

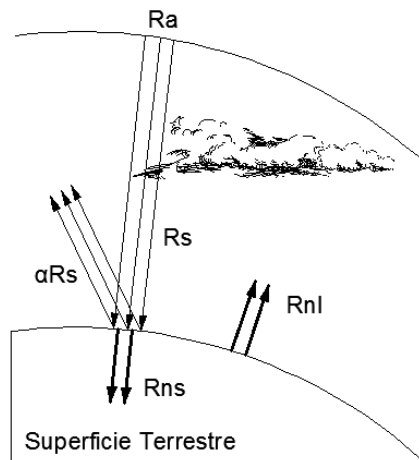


Figura 6. Diagrama de la radiación entrante y saliente de la superficie terrestre.

La radiación existente antes de llegar a la atmósfera es constante y tiene un valor aproximado de $0,082 \text{ MJ m}^{-2} \text{ min}^{-1}$. Aunque la intensidad de esta radiación en un punto específico de la tierra, depende del ángulo de incidencia de los rayos del sol, así como de la distancia relativa inversa de la Tierra al Sol, y la Latitud, esta intensidad local se le conoce como radiación extraterrestre (R_a).

Después de que la radiación extraterrestre atraviesa la atmósfera, esta se dispersa, debido a los gases, nubes o polvos atmosféricos, la radiación que no se dispersa, se le conoce como radiación solar o de onda corta (R_s).

Una cantidad considerada de la radiación solar entrante es reflejada por la superficie terrestre, la fracción que es reflejada de la superficie solar o de onda corta, se le conoce como albedo (α).

La radiación solar absorbida es convertida en energía térmica y es expulsada de la superficie terrestre mediante varios procesos, esta se le conoce como radiación de onda larga, una parte de esta radiación saliente calienta la atmósfera, la cual produce energía y devuelve una parte de la radiación a la superficie terrestre, por lo que se conoce como radiación neta de onda larga a la diferencia entre la radiación saliente de onda larga y la radiación entrante producida debido al calentamiento de la atmósfera.

Por lo que para poder hallar la radiación solar neta, la cual es la diferencia entre la radiación solar de onda corta y la radiación neta de onda larga, se necesita conocer varios parámetros como la radiación extraterrestre, la radiación solar, el albedo, la



radiación de onda corta, la distancia relativa inversa de la tierra al sol, la latitud, la declinación solar.

Radiación extraterrestre

$$R_a = \frac{24 \times 60}{\pi} G_{sc} d_r [\omega_s \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(\omega_s)] \quad \text{Ec. 15}$$

Donde:

R_a : Radiación extraterrestre ($MJ m^{-2} día^{-1}$)

G_{sc} : Constante solar: $0.082 MJ m^{-2} día^{-1}$

d_r : Distancia relativa inversa Tierra al Sol

ω_s : Ángulo de radiación a la puesta del sol (Rad)

φ : Latitud (Rad)

δ : Declinación Solar (Rad)

Para determinar la distancia relativa inversa Tierra al sol, se aplica Ecuación 16:

$$d_r = 1 + 0.033 \cos\left(\frac{2\pi}{365} J\right) \quad \text{Ec. 16}$$

La declinación solar se halla mediante la Ecuación 17:

$$\delta = 0.409 \sin\left(\frac{2\pi}{365} J - 1.39\right) \quad \text{Ec. 17}$$

Donde J es el número de días que existen desde el inicio del año hasta la mitad del período calculado, en este caso se utilizará la mitad del mes. También se le conoce como fecha juliana.

El ángulo de radiación a la hora de la puesta del sol (ω_s), Ecuación 18:

$$\omega_s = \arccos(-\tan(\varphi) \tan(\delta)) \quad \text{Ec. 18}$$

Radiación de onda corta

Para determinar la radiación neta de onda corta, primero se necesita conocer la radiación solar de onda corta, esta se expresa mediante la Ecuación 19:

$$R_s = \left(a_s + b_s \frac{n}{N}\right) R_a \quad \text{Ec. 19}$$



Donde:

R_a : Radiación solar o de onda corta ($MJ m^{-2} día^{-1}$)

a_s : Constante de regresión, que expresa la radiación que llega a la tierra en días muy nublados ($n = 0$)

$a_s + b_s$: Fracción de radiación que llega a la tierra e días despejados ($n = N$)

n : Duración real de insolación

N : Duración máxima posible de insolación

R_a : Radiación extraterrestre ($MJ m^{-2} día^{-1}$)

$\frac{n}{N}$: Duración relativa de insolación

Radiación Solar en un día despejado

$$R_{so} = (a_s + b_s)R_a \quad \text{Ec. 20}$$

Donde:

R_{so} : Radiación Solar en un día despejado ($MJ m^{-2} día^{-1}$)

$a_s + b_s$: Fracción de radiación que llega a la tierra e días despejados ($n = N$)

R_a : Radiación extraterrestre ($MJ m^{-2} día^{-1}$)

Radiación solar neta o de onda corta

$$R_{ns} = (1 - \alpha)R_s \quad \text{Ec. 21}$$

Donde:

R_{ns} : Radiación solar neta o de onda corta ($MJ m^{-2} día^{-1}$)

R_s : Radiación solar o de onda corta ($MJ m^{-2} día^{-1}$)

α : Albedo o coeficiente de reflexión del cultivo que es 0.23

Radiación neta o de onda larga

$$R_{nl} = \sigma \left(\frac{T_{max,K}^4 + T_{min,K}^4}{2} \right) (0.34 - 0.14\sqrt{e_a}) \left(1.35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0.35 \right) \quad Ec. 22$$

Donde:

R_{nl} : Radiación neta de onda larga ($MJ m^{-2} día^{-1}$)

σ : Constante de Stefan Boltzman ($4.903 \times 10^{-9} MJ K^{-4} m^{-2} día^{-1}$)

$T_{max,K}$: Temperatura máxima absoluta durante un período de 24 horas (K)
 $= °C + 273.16$)

$T_{min,K}$: Temperatura mínima absoluta durante un período de 24 horas (K)
 $= °C + 273.16$)

Radiación neta solar

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad Ec. 23$$

Donde:

R_n : Radiación neta solar ($MJ m^{-2} día^{-1}$)

R_{nl} : Radiación neta de onda larga ($MJ m^{-2} día^{-1}$)

R_{ns} : Radiación solar neta o de onda corta ($MJ m^{-2} día^{-1}$)

Al conocer la radiación solar neta, se utiliza la *Ecuación 8*, para el valor de la evapotranspiración, conociendo el área del macrodeslizamiento y la *Ecuación 5* para la lámina de agua escurrida, hallando el valor del caudal que existe en el macrodeslizamiento.

2.4.3 EVAPOTRANSPIRACIÓN CON EL MÉTODO DE THORNTHWAITE

CÁLCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL

El método de Thornthwaite se basa en la determinación la evapotranspiración en función de la temperatura media del lugar de estudio, con una corrección en función de la duración astronómica del día y el número de días del mes.

Autoría: Paula Gutiérrez Neira
 Pedro Sánchez León



Tomando la temperatura corregida de la estación Palmas, como temperatura media mensual del macrodeslizamiento, se calcula un índice de calor mensual *Ecuación 24*, a partir de la las temperaturas.

$$i = \left(\frac{T}{5}\right)^{1.514} \quad \text{Ec. 24}$$

Se obtiene el índice de calor anual que es la sumatoria de los índices de calores mensuales *Ecuación 25*, para los meses teóricos de 30 días y 12 horas diarias de sol.

$$I = \sum_{i=1}^{12} i_i \quad \text{Ec. 25}$$

Evapotranspiración potencial sin corregir

$$ETP_{sincorr.} = 16 \left(\frac{10t}{I}\right)^a \quad \text{Ec. 26}$$

Donde:

$ETP_{sincorr.}$: Evapotranspiración potencial para meses de 30 días y 12 horas de sol

t : Temperatura media mensual ($^{\circ}\text{C}$)

I : Índice de calor anual

a : $675 \times 10^{-9} I^3 - 771 \times 10^{-7} I^2 + 1792 \times 10^{-5} I + 0.49239$

Evapotranspiración potencial corregida

La corrección para la evapotranspiración potencial se realiza de acuerdo al número máximo de horas de sol y al número de días del mes *Ecuación 27* (Díaz 2003).

$$ETP = ETP_{sincorr.} \left(\frac{N}{12}\right) \frac{d}{30} \quad \text{Ec. 27}$$

Donde:

ETP : Evapotranspiración potencial corregida.

$ETP_{sincorr.}$: Evapotranspiración potencial para meses de 30 días y 12 horas de sol.

N : Número máximo de horas de sol, dependiendo del mes y de la latitud.

d : Número de días del mes.



Al obtener la evapotranspiración potencial corregida, se pudo hallar la lámina de agua escurrida con la ecuación del balance hídrico simplificado *Ecuación 5*, y con el área delimitada del macrodeslizamiento se calcula el valor del caudal que existe en el mismo.

2.4.4 EVAPOTRANSPIRACIÓN CON EL MÉTODO DE BLANEY CRIDDLE

CÁLCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN REAL

Para poder calcular la evapotranspiración real, primero se ha calculado el factor *f* *Ecuación 28* que está en función de la relación del número de horas de sol por mes, con respecto al total anual.

$$f = \left[\frac{T+17.8}{21.8} \right] P \times d \quad \text{Ec. 28}$$

Donde:

T: Temperatura media mensual (°C)

P: Duración de horas de sol mensuales con respecto al total anual

d: Relación entre la duración en días del ciclo vegetativo en el mes y el n° total de días del mes

El ciclo vegetativo empieza en la época de siembra y termina en la época de cosecha del cultivo, en caso de cultivos perennes como el pasto, la relación entre el ciclo vegetativo y el número total de días en cada mes siempre será 1.

Evapotranspiración Real

El cálculo de la evapotranspiración real *Ecuación 29*, se la hace mensualmente, debido a que los coeficiente de corrección por el tipo de cultivo, y el clima, varían mensualmente (*Juan Santiago Leiton Soubannier 1985*).

$$ET = ET_o K_c \frac{K_G}{K'} \quad \text{Ec. 29}$$

Donde:

ET: Evapotranspiración real

ET_o: Evapotranspiración de referencia

K_c: Coeficiente de tipo de cultivo



K_G : *Coeficiente global del cultivo*

K' : *Coeficiente de ajuste*

El valor de los coeficientes de tipo de cultivo K_c y coeficiente global del cultivo K_G , se hallan mediante las tablas del Anexo 6.

Cuando se realizó la visita a campo del macrodeslizamiento se constató que la superficie está cubierta en su mayoría por pastos, y una menor parte por cultivos de maíz. La fecha de siembra y cosecha en Llamacón son agosto y marzo respectivamente.

Mediante el uso de una imagen satelital del macrodeslizamiento, se determinó el área del suelo ocupado por pastos y cultivos de maíz.

- El coeficiente de ajuste *Ecuación 30*, es igual para todos los meses.

$$K' = \frac{\sum_{i=1}^{12} (ET_o K_c)_i}{\sum_{i=1}^{12} f_i} \quad \text{Ec. 30}$$

- La evapotranspiración de referencia mensual se calcula mediante *Ecuación 31*:

$$ET_o = f (Kt) \quad \text{Ec. 31}$$

Donde:

f : *Factor, determinado en la Ecuación 26*

Kt : *Factor de temperatura, se determina en función de la temperatura media mensual, mediante:*

$$Kt = 0.03114T + 0.2396 \quad \text{Ec. 32}$$

Mediante la *Ecuación. 27* Se obtiene la evapotranspiración real debido a que se han incluido los factores de acuerdo al tipo de cultivo a los cálculos, con esto se halla la lámina de agua escurrida con la ecuación del balance hídrico simplificado *Ecuación 5*, y con el área de las cuencas de las quebradas se calcula el valor de la lámina escurrida que existe en el mismo.

2.5 CAMPAÑA DE AFOROS

Con la campaña de aforos se espera obtener un caudal medio mensual de las quebradas, el mismo que se comparará con la serie histórica de caudales obtenida con

los diferentes métodos, el caudal aforado se espera que sea alto, debido a que el mes de septiembre de 2016 fue un mes muy húmedo respecto a la serie histórica de precipitaciones *Figura 12*. A pesar de que los caudales calculados también dependen de la evapotranspiración, pero ésta al ser una variable que no depende de la precipitación (en el caso donde no hay estrés hídrico), esto quiere decir que existe una correlación positiva entre los valores de precipitación y caudal (a mayor precipitación; mayor caudal), por lo que si el caudal aforado es bajo podría indicar que posiblemente existe infiltración de agua, la cual podría estar empeorando las condiciones del macrodeslizamiento.

Para aforar el caudal total que circula por la cuenca se eligió un punto de aforo cercano a la desembocadura al embalse. Ya que a lo largo de todo el trayecto de las quebradas se acumulan caudales debido a la escorrentía superficial que se une por la topografía de la cuenca.

Se tomaron en cuenta los parámetros necesarios para aforar el agua de las quebradas cuando ésta se encuentre en flujo uniforme, el tramo elegido para aforar debía ser recto, sin obstáculos, de manera que se evite el flujo turbulento.

En el estudio se asumió como caudal medio mensual el promedio de aforos puntuales realizados a lo largo del mes, y esto genera un error que afecta la validación de la hipótesis de la infiltración como causa principal en la aceleración de los movimientos de tierra.

2.5.1 MATERIALES EMPLEADOS

MOLINETE PRICE El aforador de corrientes más utilizado en la actualidad, consta de seis cazoletas cónicas que rotan en torno a un eje vertical y provisto de un set de 2 veletas de cola en ángulo recto.



Figura 7. Molinete Price

DIGITALIZADOR O SENSOR ELECTRÓNICO Este dispositivo transforma la diferencia de voltaje en revoluciones, las cuales se traducen en velocidad de flujo en el mismo aparato, registrándose además el tiempo requerido para una observación. Son



empleados también sensores menos sofisticados que emiten un chasquido audible por cada revolución, dicho sonido es transmitido por el sensor hasta unos audífonos que son usados por el operador quien cuenta el número de revoluciones en un determinado intervalo de tiempo.

La ecuación a través de la cual se determina la velocidad de la corriente del flujo en m/s en función de las revoluciones y el tiempo en segundos empleado en la medición es:

$$v = \left[\left(\frac{r}{t} \right) (0.68279 + 0.011333) \right] \quad \text{Ec. 33}$$

Donde:

v: velocidad de la corriente en (m/s)

r: revoluciones

t: tiempo

BARRA O VÁSTAGO DE SOPORTE El molinete es apoyado por una barra o vástago plano que pasa a través de una ranura en un yugo que se encuentra unido a una estructura que sostiene el juego de tazas cónicas y al interruptor del sistema eléctrico que acciona el circuito, y es asegurado por un perno que le permite un cierto movimiento vertical. Gracias a esta barra el molinete puede conservar una dirección paralela a la dirección de la corriente.

FICHA TÉCNICA DE AFORO Facilita la recolección y procesamiento de los datos. El modelo de ficha utilizado se encuentra en *Anexo 7*.

2.6 OBRAS HIDRÁULICAS

Después de la campaña de aforos se eligió los puntos fijos de aforo en las quebradas principales. Los vertederos serán diseñados para medir las tendencias y los cambios en la escorrentía superficial, los mismos que generarán datos continuos de caudal que servirán para analizar el fenómeno de la infiltración con mayor precisión, de manera que también se pueda analizar la validez de la ecuación del balance hídrico para analizar infiltración de caudales en la zona del macrodeslizamiento.

2.6.1 CAUDAL DE DISEÑO

El caudal de diseño para los vertederos será el caudal máximo de la serie histórica generara para las cuencas del macrodeslizamiento multiplicado por un factor de



mayoramiento. Debido a que con los métodos convencionales sobredimensionan este valor.

2.6.2 VERTEDEROS

Según la Norma Técnica de la Compañía Ambiental de São Paulo, Brasil (CETESB L4.120.1a); Un sistema completo de medición está conformado por: canal de aproximación, estructura de medición, indicadores de nivel de agua, y canal aguas abajo. Estos elementos deben cumplir con condiciones técnicas pues estas influyen directamente en la precisión de las mediciones. Es importante dar un mantenimiento constante sin permitir la acumulación de agentes perturbadores (ejemplo lodo, vegetación, algas). Y en caso de existir fugas estas deben repararse cuidadosamente.

VERTEDERO es un muro o una barrera que se oponen al flujo al flujo, utilizado para controlar y medir pequeños caudales de líquidos en canales abiertos. Consta básicamente de un corte de forma y acabado geométrica bien definida, practicado en una plancha resistente, por la cual escurre el líquido, manteniendo la superficie libre. Una de las desventajas es que se puede colmatar de sedimentos.

En general hay dos tipos de vertederos, los de pared delgada y gruesa. Los vertederos de pared delgada se usan básicamente para determinar el caudal en cualquier momento en una corriente pequeña. Los vertederos de pared gruesa se usan principalmente para control de excedencias, y su evacuación puede ser libre o controlada. Los vertederos que ahora interesan son los de pared delgada y dentro de estos los más utilizados son: rectangular, triangular y trapezoidal.

CARGA HIDRÁULICA h altura alcanzada por el agua, la cual se considera desde la cota de la cresta del vertedero.

COEFICIENTE DE DESCARGA O GASTO C relación entre el caudal medio y el caudal calculado teóricamente.

Condiciones para vertederos de pared delgada:

- La carga hidráulica máxima es de 50 cm, a fin de evitar problemas de erosión y de construcción.
- Por motivos de orden práctico, los vertederos rectangulares se usan para caudales que se estima no serán superiores a 1 m³/s

Medición de la carga hidráulica La carga hidráulica debe medirse con un limnómetro de punta curvada, regla graduada o, con un medidor de nivel tubular graduado, cuando



no se exijan mediciones continuas; cuando necesita registro o mediciones continuas, se usaran fluctuadores registradores.

2.6.2.1 VERTEDEROS RECTANGULARES

Un vertedero es una placa cortada de forma regular a través de la cual fluye el agua. Son utilizados, intensiva y satisfactoriamente, en la medición del caudal de pequeños cursos de agua y conductos libres, así como en el control del flujo en galerías y canales.

Ecuación de caudal para vertederos:

$$Q = C \frac{2}{3} \sqrt{2g} b h^{2/3} \quad \text{Ec. 34}$$

Donde:

$$Q = \text{Caudal } (m^3/s)$$

C = Coeficiente de descarga

g = Aceleración de la gravedad $(\frac{m}{s^2})$

b = Ancho efectivo de la sección (m)

h = Carga hidráulica (m)

Coeficiente de descarga (Sociedad Suiza de Ingenieros y Arquitectos) para vertederos rectangulares

$$C = \left(0.578 + 0.037 \left(\frac{b}{B} \right)^2 + \frac{0.003615 - 0.0030 \left(\frac{b}{B} \right)^2}{h + 0.0016} \right) \left(1 + 0.5 \left(\frac{b}{B} \right)^4 \left(\frac{h}{h+p} \right)^2 \right) \quad \text{Ec. 35}$$

Donde:

C = Coeficiente de descarga

b = Ancho efectivo de la sección (m)

B = Ancho del canal aguas arriba del vertedero (m)

h = Carga hidráulica (m)

p = altura desde la base del canal al inicio del vertedero (m)

Esquema de un Vertedero rectangular. (*Figura 8.*)

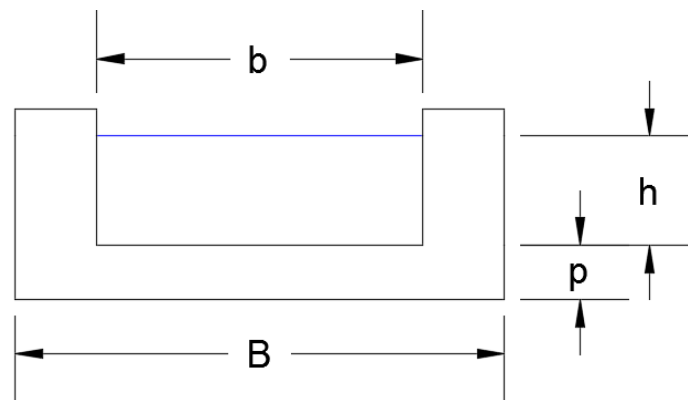


Figura 8. Esquema de vertedero rectangular.



2.7 INTERPRETACIÓN DEL DIAGRAMA DE CAJA

El diagrama de caja es un resumen gráfico de la distribución de un conjunto de datos o valores, en donde se puede apreciar su forma, tendencia central y variabilidad. Se escogió los diagramas de caja, ya que en estos se observan gráficamente la distribución y variabilidad de valores de caudal, analizando si el caudal aforado de septiembre del 2016 es un valor normal que corresponde al valor de precipitación medido del mismo mes, ya que existe una correlación entre precipitación y caudal, gracias a esto se puede afirmar una posible infiltración de caudal, la cual podría estar incrementando las áreas deslizables en la zona afectada.

Mediante la interpretación de los diagramas de caja se puede conocer si existe influencia del agua en la aceleración del macrodeslizamiento, ya que las áreas deslizables se han multiplicado por 10 desde el año 1984, para esto se construye el diagrama de caja con la serie histórica de caudales de los meses de septiembre, en éste diagrama de caja se traza la línea del caudal aforado del mes de septiembre, para su posterior interpretación (Figura 9).

2.7.1 CONSTRUCCIÓN DEL DIAGRAMA DE CAJA

Para la construcción del diagrama de caja, se eliminaron los valores incongruentes (negativos). Después de tener los valores de caudal validados de septiembre, se procede a encontrar los valores del caudal máximo y mínimo, después se calcula el primer cuartil, la mediana y el tercer cuartil del rango de datos, estos datos son necesarios para definir el diagrama de caja.

Se definen las clases, y el ancho de cada clase para los datos de caudal, con las clases, se hallan las frecuencias observando los datos obtenidos de caudal.

Con las clases definidas, se calcula la ubicación de los cuartiles mediante *Ecuación 38*:

$$Uc = \frac{KN}{4} \quad \text{Ec. 36}$$

Donde:

K: Depende del N° de cuartil (2 para la mediana)[1, 2, 3 o 4].

N: N° de datos o frecuencia absoluta.

Conociendo la ubicación del cuartil, el cálculo de este se realiza mediante la siguiente fórmula: (Esta se usa para el primer cuartil, mediana y tercer cuartil)

$$Q_k = L_i + \frac{\frac{KN}{4} F_{i-1}}{f_i} a_i \quad \text{Ec. 37}$$

Donde:

L_i : Límite inferior de la clase en donde se encuentra el cuartil.

N : Es la suma de las frecuencias absolutas.

a_i : Amplitud de la clase.

F_{i-1} : Frecuencia acumulada anterior a la clase del cuartil.

Con los valores del primer cuartil, mediana, tercer cuartil, máximo y mínimo definidos, se construye el diagrama de caja, la interpretación del diagrama de caja no evidencia la existencia de infiltración, ya que la escorrentía depende de la precipitación.

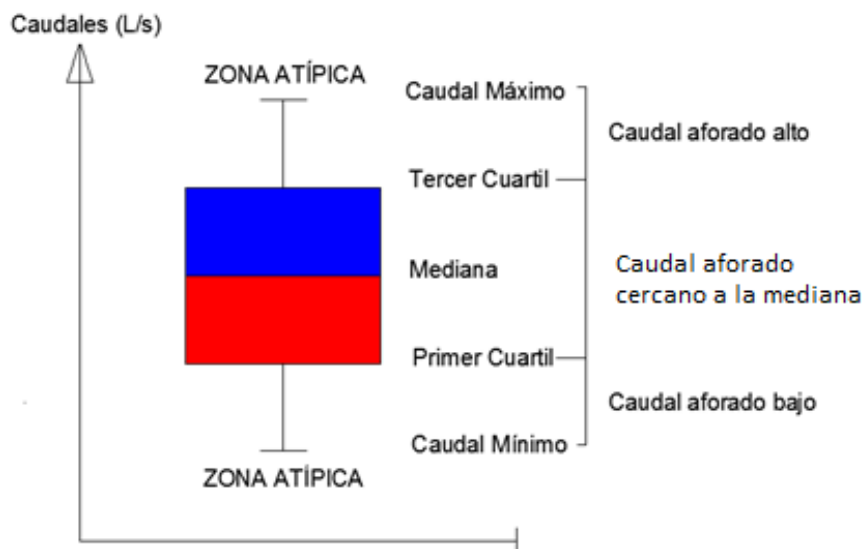


Figura 9. Interpretación de las zonas del diagrama de caja con respecto a la serie histórica.



CAPÍTULO 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 DELIMITACIÓN DEL MACRODESLIZAMIENTO

3.1.1 MÉTODO DIGITAL (GIS) ANÁLISIS DE MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES

- Se realizó un análisis morfológico en donde se determinó mediante el uso de ARCGIS que la pendiente predominante en la zona afectada es de 20.25%, lo que se podría considerarse como un terreno accidentado según la clasificación de Heras (*Anexo 4*), un tipo de terreno accidentado es probablemente un factor que acelera el deslizamiento de áreas.
- Debido a que la zona se ha dedicado a la agricultura principalmente no tiene vegetación densa en donde se pueda observar claramente discontinuidades, fallas o estrías.
- Con la foto aérea se determinó inicialmente al movimiento de tierras como un *deslizamiento activo con baja vegetación*.

3.1.2 MÉTODO DE CAMPO

- En las visitas a la zona se notó que las infraestructuras y la vegetación coinciden con la que se distinguió en las imágenes satelitales
- Una ventaja de este método es que se pudo observar que la quebrada “A” tiene zonas donde el flujo se dispersa debido al deslizamiento del suelo, como se muestra en el mapa del *Anexo 8*. Una nueva hipótesis sería que el agua se infiltra en el suelo aumentando peso de este y colaborando al movimiento.
- Debido al drenaje superficial en mal estado los cauces de agua no tenían flujo continuo, esto hacía que el agua dispersara y se infiltrara en el terreno, lo que posiblemente provocaba la existencia de afloramientos de agua en muchas partes del terreno.
- El deslizamiento se lo clasificó como un *deslizamiento rotacional activo con baja vegetación*.

3.1.3 COMPARACIÓN DE DELIMITACIONES

Se colocan los puntos obtenidos en el método de campo en Qgis y para generar una nueva delimitación, el deslizamiento tomado en campo coincide con la zona de la primera delimitación sobre la imagen satelital pero este es más pequeño. *Figura 10*.

Con la delimitación se pudo comparar con una previa realizada por CELEC EP y la zona afectada estaba también sobre la vía principal VIA A GUARAGNAY. *Figura 11.*

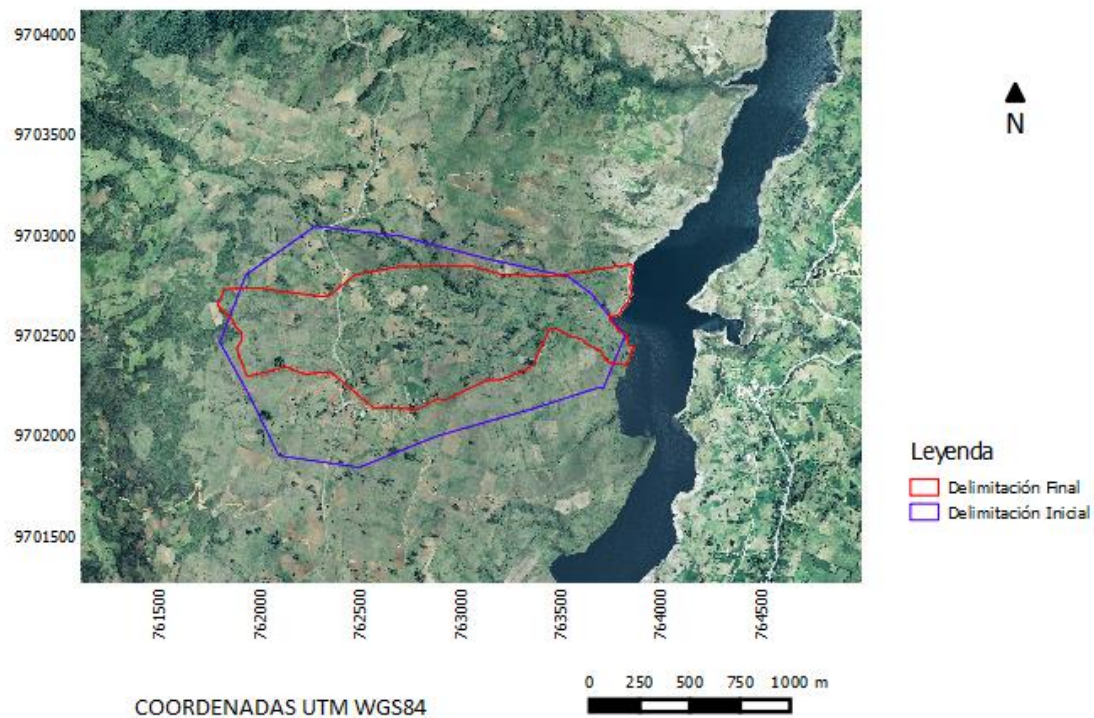


Figura 10. Mapa de delimitación inicial y final: La delimitación inicial (167ha) se realizó mediante el método digital, mientras que la delimitación final (99ha) se la realizó con el método de campo, con una diferencia de 68.7ha entre ambas.

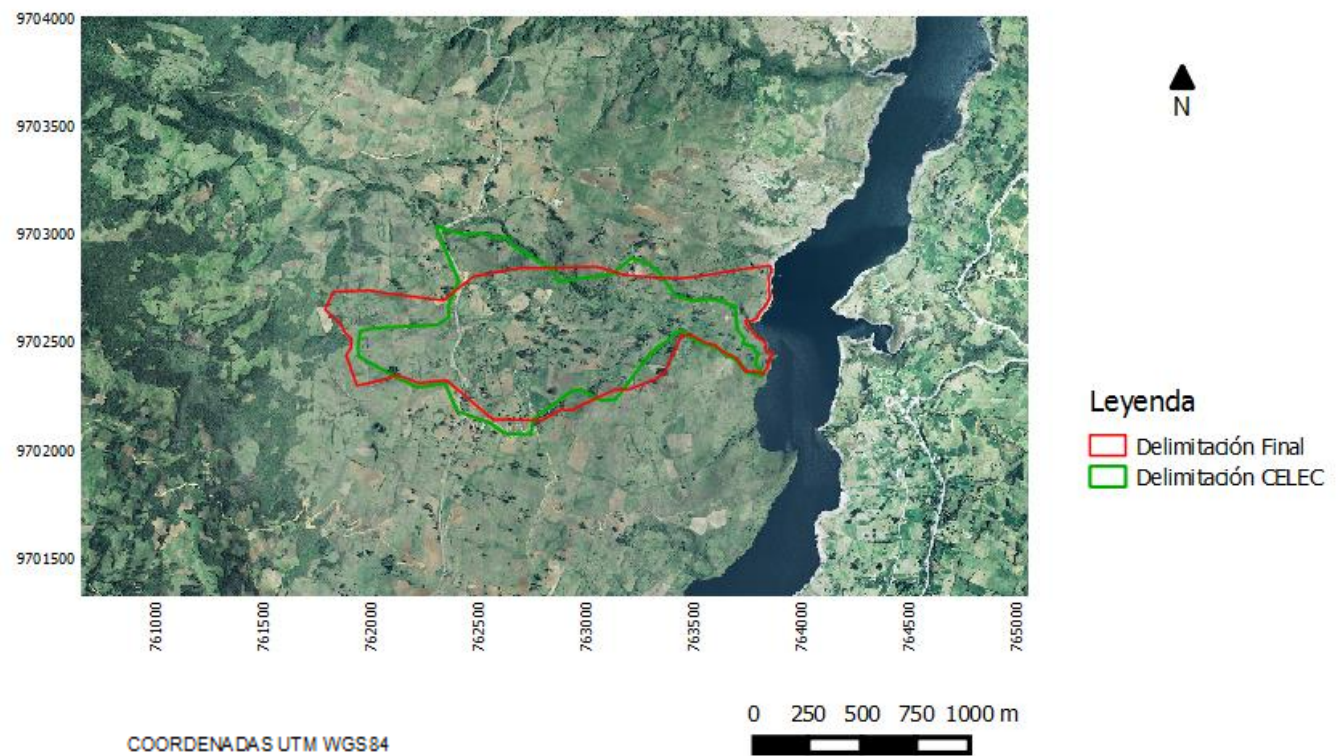


Figura 11. Mapa de la delimitación final (99ha) y delimitación de CELEC (86ha): Según la delimitación final la corona del deslizamiento ha crecido notablemente, se trata de un deslizamiento rotacional debido su forma cóncava con grietas radiales y transversales al movimiento de áreas deslizables, con una diferencia de 13ha.

3.2 ANÁLISIS HIDROMETEOLÓGICO

CARACTERIZACIÓN DEL RÉGIMEN CLIMÁTICO

PRECIPITACIÓN

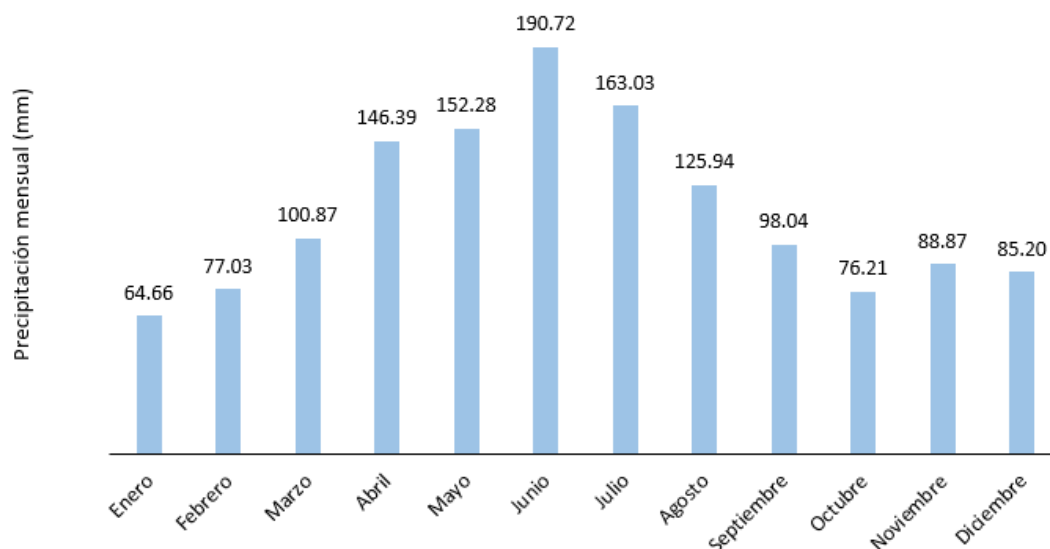


Figura 12. Régimen de precipitaciones de Llacón: Precipitaciones bien distribuidas a lo largo del año, con disminuciones de Septiembre a Febrero.

Como se puede observar en el gráfico de precipitaciones *Figura 12*, las precipitaciones medias mensuales muestran una tendencia bimodal, por lo que se concluye que la zona del macrodeslizamiento, pertenece al régimen pluvial persistente muy húmedo de la región amazónica (buena distribución en las precipitaciones salvo con ligeras disminuciones entre Octubre y Febrero). Con su período de invierno en los meses de Marzo, Abril, Mayo, Junio, Julio, Agosto.

VELOCIDAD DE VIENTO

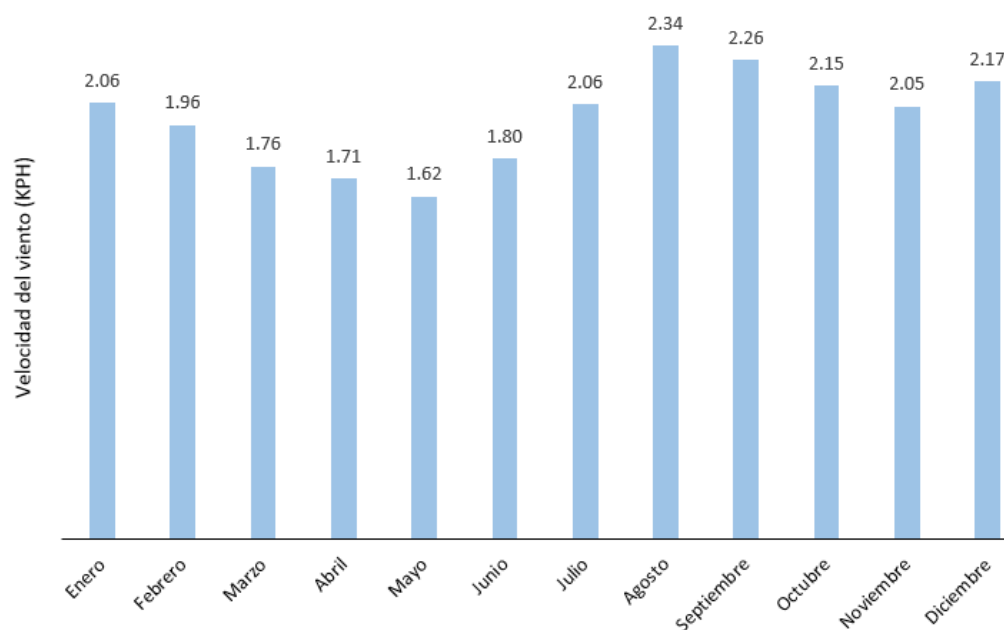


Figura 13. Velocidad del viento mensual en Llacón: Medida a 2m de altura desde el suelo, con vientos mensuales menores en la época lluviosa.

Como se puede observar en el gráfico de velocidad del viento *Figura 13*, está no sobrepasa los 3m/s, los meses con mayor viento son de Agosto y Septiembre, con 2.33 m/s y 2.26 m/s respectivamente, además el mes con menor viento en los registros es Mayo con 1.62m/s.

RÉGIMEN DE TEMPERATURA

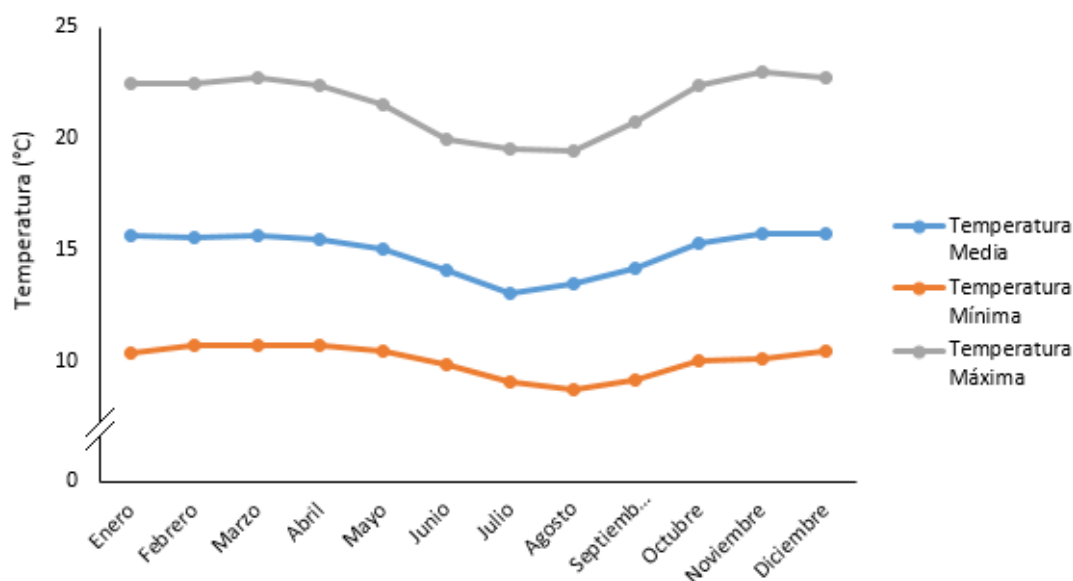


Figura 14. Régimen de Temperatura de Llacón



Como se puede observar en el gráfico de régimen de temperaturas *Figura 14*. La zona del macrodeslizamiento existe una temperatura media anual de 14.93°C, se observa un régimen bimodal en la temperatura, correspondiendo las temperaturas más altas para la época de invierno.

3.3 TRANSPOSICIÓN DE CAUDALES

Con la ecuación se generó una serie de caudales que se encuentra en el *Anexo 3*. Para realizar el análisis entre los diagramas de caja de caudal con precipitación, se optó por utilizar la lámina escurrida (mm), la misma que es igual al caudal mensual dividido por m² de la cuenca.

Resultados obtenidos con Transposición de caudales se presentan en la *Tabla 2* y en las *Figuras 15 y 16*:

Tabla 2. Valores de diagrama de caja con transposición de caudales

	Lámina escurrida (mm)	Datos del Gráfico
Mínimo	26.43	26.43
Primer cuartil	32.19	5.76
Mediana	70.52	38.32
Tercer cuartil	111.88	41.36
Máxima	130.47	18.59

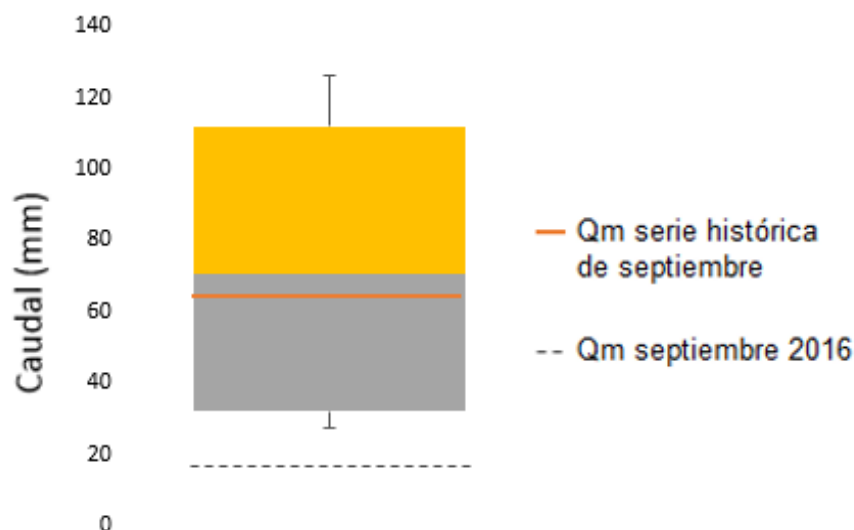


Figura 15. Diagrama de caja transposición de caudales QA: El caudal medio mensual de septiembre del 2016 para la quebrada “A” se encuentra en la zona atípica del diagrama de caja, con una diferencia de la lámina media de la serie histórica de 37.95mm.

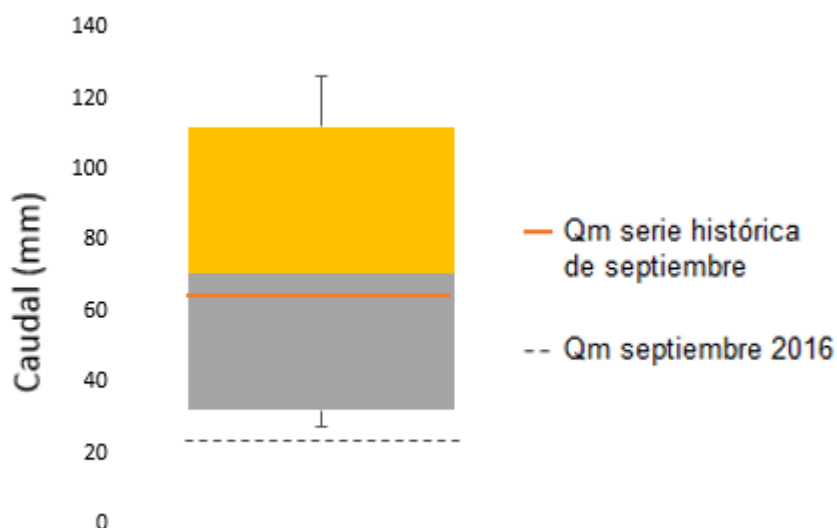


Figura 16. Diagrama de caja transposición de caudales QB: El caudal de septiembre del 2016 para la quebrada “B” se encuentra en el primer cuartil del diagrama de caja, con una diferencia del caudal medio de la serie histórica de 33.672mm.

3.4 BALANCE HÍDRICO

3.4.1 MÉTODO DE THORNTHWAITE

La serie de caudales que se obtuvo con éste método, con la *Ecuación 4* se presentan en el *Anexo 3*.



El número máximo de horas de sol para la zona es igual a 12.1 horas, con las temperaturas medias se calculó la evapotranspiración:

Lámina escurrida media de la quebrada “A”: 55.94mm.

Lámina escurrida media de la quebrada “B”: 61.21mm.

Resultados obtenidos con Thornthwaite se presentan en la *Tabla 3* y en las *Figuras 17 y 18*:

Tabla 3. Valores de diagrama de caja con Thornthwaite

	Quebrada "A"		Quebrada "B"	
	Lámina escurrida (mm)	Datos del Gráfico	Lámina escurrida (mm)	Datos del Gráfico
Mínimo	8.06	8.06	13.23	13.23
Primer cuartil	32.34	24.28	37.88	24.65
Mediana	48.04	15.70	53.16	15.28
Tercer cuartil	72.63	24.59	77.87	24.71
Máxima	126.89	54.25	132.65	54.78

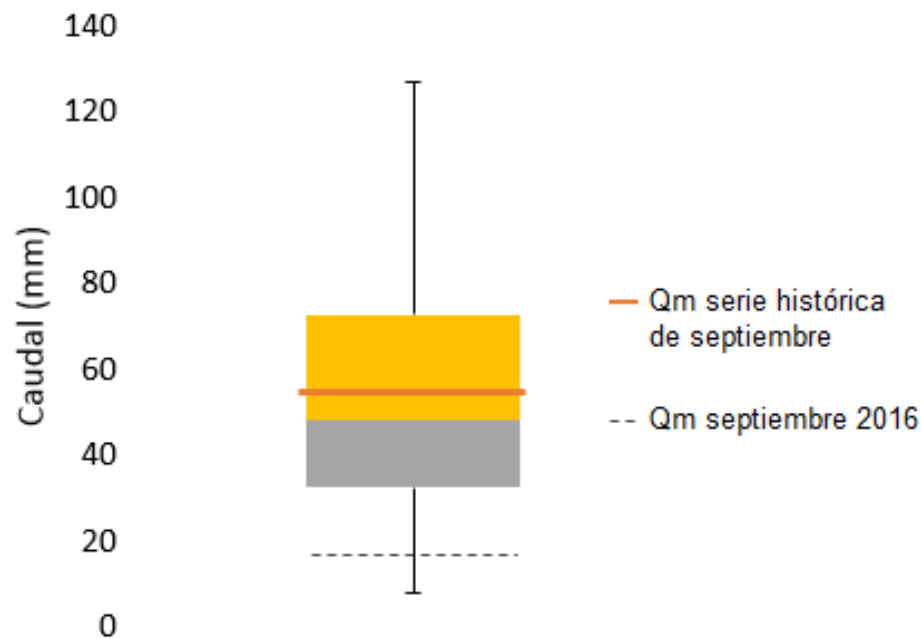


Figura 17. Diagrama de caja Thornthwaite QA: El caudal de septiembre del 2016, se encuentra dentro del primer cuartil, con una diferencia de 38.3mm con respecto al caudal medio de la serie histórica.

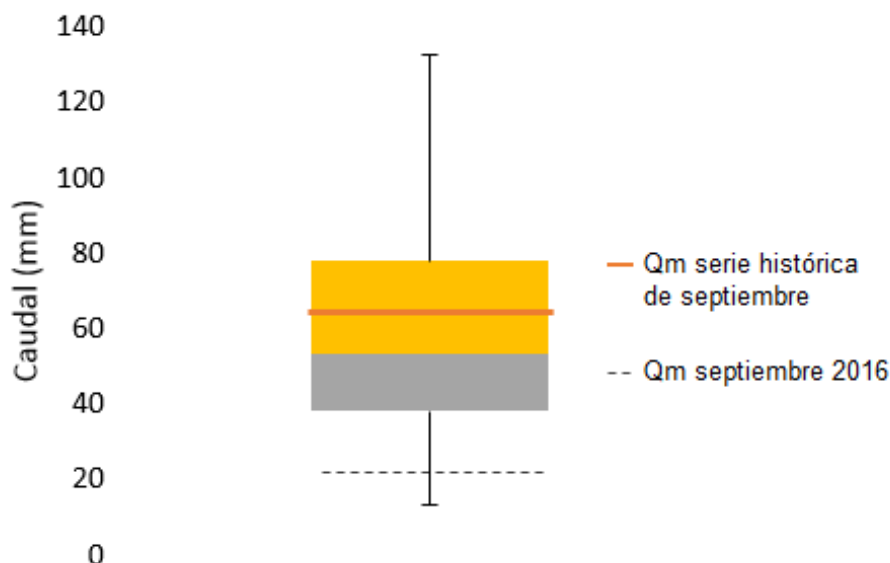


Figura 18. Diagrama de caja Thornthwaite QB: El caudal de septiembre del 2016, se encuentra dentro del primer cuartil, con una diferencia de 39.29mm con respecto al caudal medio de la serie histórica de septiembre.

3.4.2 MÉTODO DE PENMAN-MONTEITH

La serie de caudales que se obtuvo con éste método, con la Ecuación 4 se presentan en el Anexo 3.

Lámina escurrida media de la quebrada "A": 39.072mm.

Lámina escurrida media de la quebrada "B": 41.2mm.

Para obtener los resultados con el método de Penman-Monteith, se usó la información dependiente de la altitud de cada cuenca Tabla 4:

Tabla 4. Valores por altitud para Penman-Monteith

	Quebrada "A"	Quebrada "B"
Altitud (msnm)	2671	2865
Y (Constante psicrométrica)	0.049	0.048
Presión atmosférica (KPa)	73.464	71.713

Se determinó las constantes e información necesaria para el método de Penman-Monteith Tabla 5:



Tabla 5. Constantes Método Penman-Monteith

ϵ (vapor de agua/aire seco)	0.622
c_p (calor específico)	0.001013
Calor latente de vaporización	2.45
ϕ (Latitud) (°)	-2.7
Gsc (Constante solar)	0.082
As	0.25
Bs	0.5
A	0.23
σ (Stefan Boltzman)	4.903E-09

Resultados obtenidos con Penman-Monteith se presentan en la *Tabla 6* y en las *Figuras 19 y 20*:

Tabla 6. Valores del diagrama de caja con Penman-Monteith

	Quebrada "A"		Quebrada "B"	
	Lámina escurrida (mm)	Datos del Gráfico	Lámina escurrida (mm)	Datos del Gráfico
Mínimo	6.72	6.72	9.62	9.62
Primer cuartil	26.82	20.09	27.87	18.25
Mediana	41.06	14.24	37.36	9.49
Tercer cuartil	49.77	8.71	46.01	8.65
Máxima	91.88	42.11	93.64	47.63

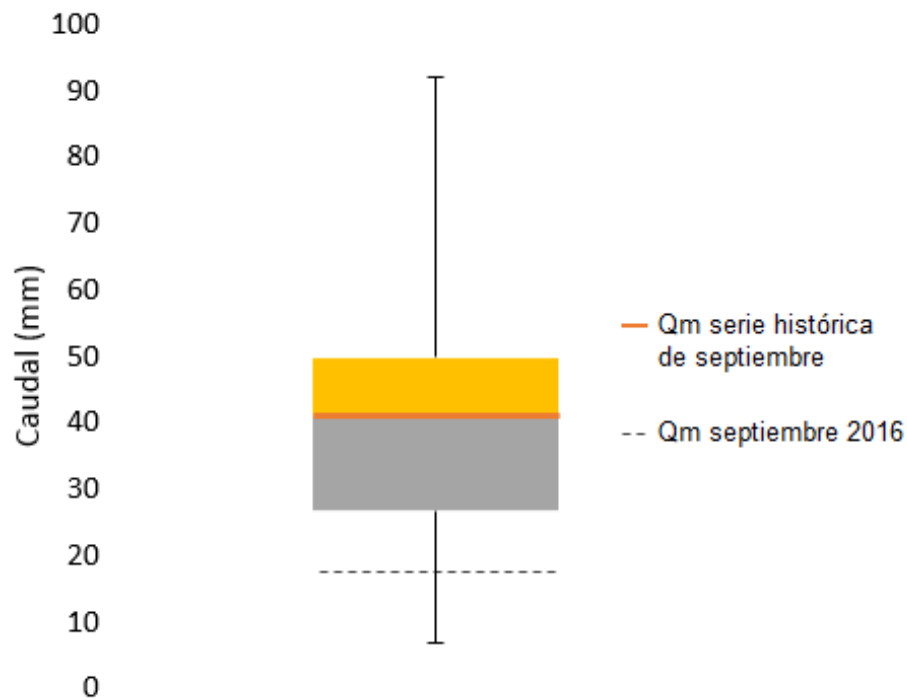


Figura 19. Diagrama de caja Penman-Monteith QA: El caudal de septiembre del año 2016, se encuentra dentro del primero cuartil, con una diferencia de 21.43mm con respecto al caudal medio de la serie histórica de septiembre.

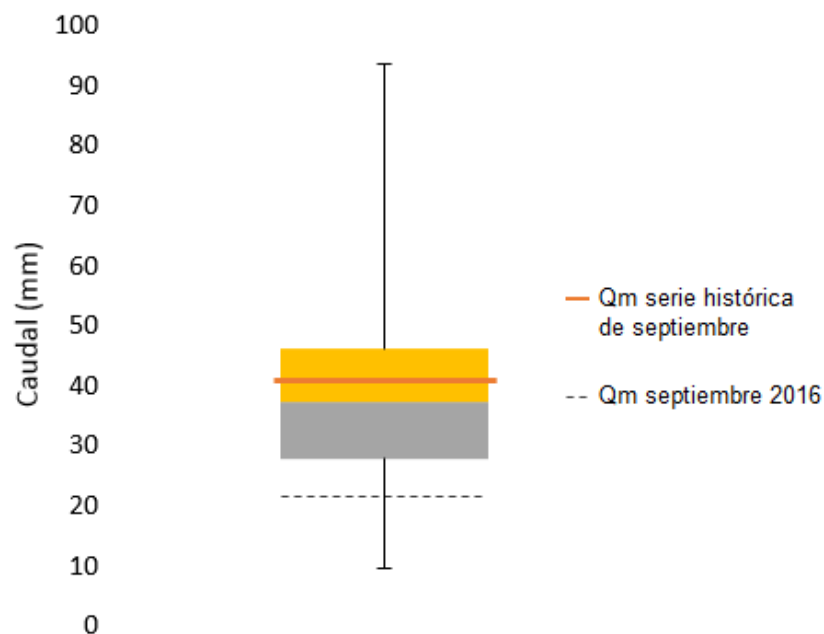


Figura 20. Diagrama de caja Penman-Monteith QB: El caudal de septiembre del 2016, se encuentra dentro del primero cuartil, con una diferencia de 19.28mm con respecto al caudal medio de la serie histórica de septiembre.



3.4.3 MÉTODO DE BLANEY CRIDDLE

La serie de caudales que se obtuvo con éste método, con la *Ecuación 4* se presentan en el *Anexo 3*.

El método de Blaney Criddle requiere los distintos porcentajes de uso de suelo y para determinarlo en las cuencas de las quebradas “A” y “B”, en donde la mayoría es pasto y cultivos, se utilizó la imagen satelital del lugar. *Figura 21*.

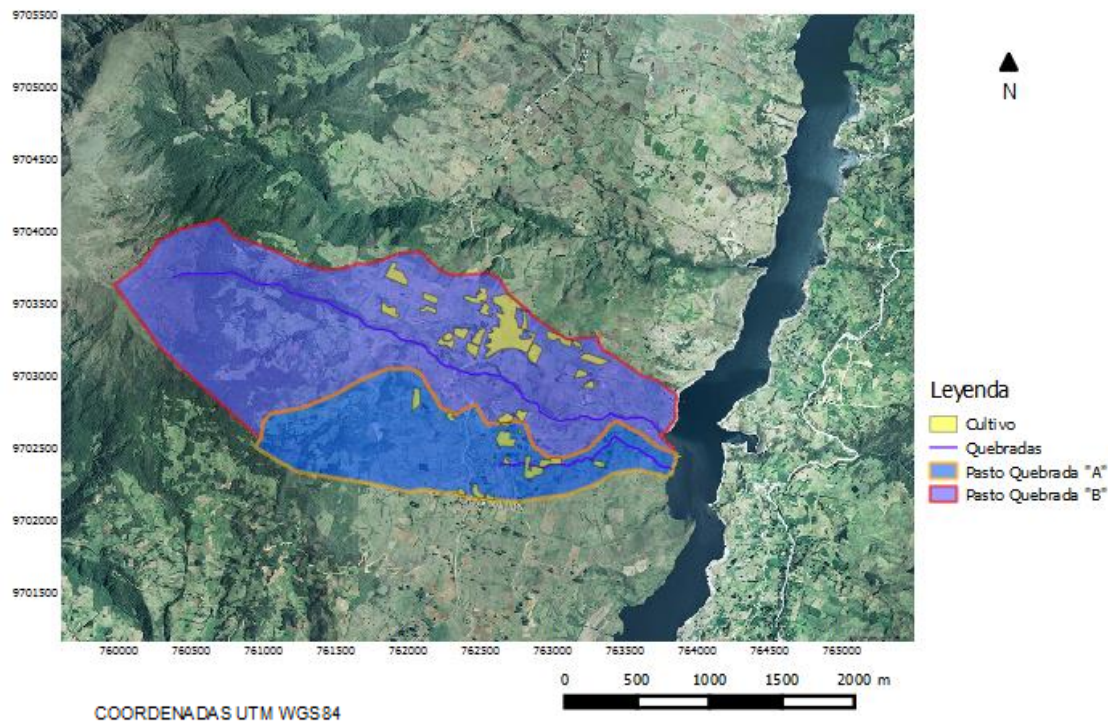


Figura 21. Mapa usos de suelo en las cuencas de las quebradas: Cerca del 94% del uso del suelo corresponde a pastos.

Se obtuvo un porcentaje de cultivo y pasto en cada cuenca *Tabla 7*:

Tabla 7. Porcentaje de cobertura vegetal para cada cuenca

	Quebrada "A"	Quebrada "B"
Pasto (m ²)	1342107	3087455
Cultivo (m ²)	51980	189034
Área (m ²)	1394087	3276489
% Pasto	96.3	94.2
% Cultivo	3.7	5.8

Lámina escurrida media de la quebrada "A": 32.22mm.

Lámina escurrida media de la quebrada "B": 37.72mm.

Resultados obtenidos con Blaney Criddle se presentan en la *Tabla 8* y en las *Figuras 22 y 23*:

Tabla 8. Valores del diagrama de caja con Blaney Criddle

	Quebrada "A"		Quebrada "B"	
	Lámina escurrida (mm)	Datos del Gráfico	Lámina escurrida (mm)	Datos del Gráfico
Mínimo	4.45	4.45	6.18	6.18
Primer cuartil	11.27	6.83	13.05	6.87
Mediana	22.57	11.29	26.09	13.05
Tercer cuartil	66.45	43.88	67.49	41.39
Máxima	71.56	5.11	73.38	5.88

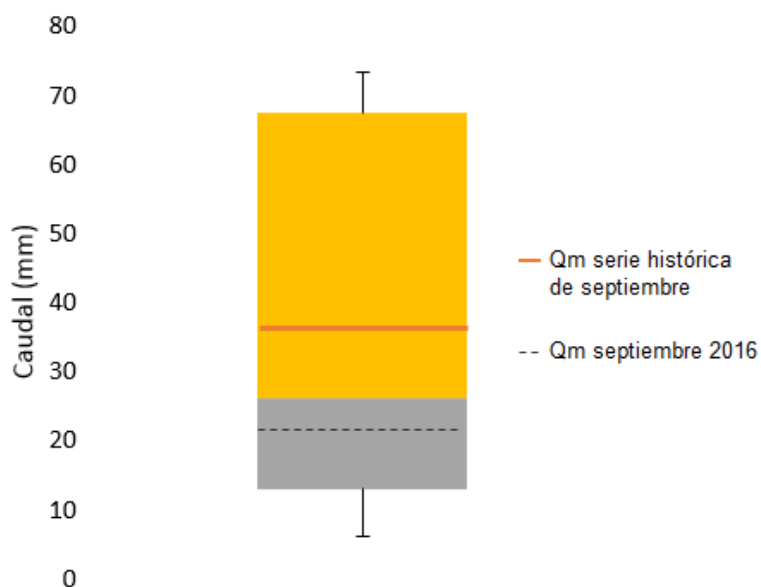


Figura 22. Diagrama de caja Blaney Criddle QA: El caudal de septiembre del 2016, se encuentra dentro del segundo cuartil, en el rango de confianza del diagrama de caja.

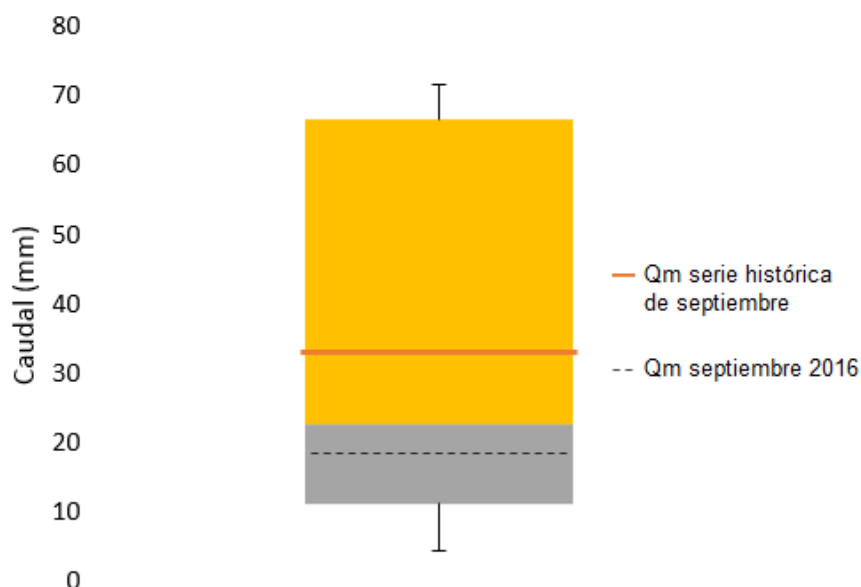


Figura 23. Diagrama de caja Blaney Criddle QB: El caudal de septiembre del 2016, se encuentra dentro del segundo cuartil, en el rango de confianza del diagrama de caja.

3.5 ANÁLISIS DE PRECIPITACIÓN

Distribución y Variabilidad en la precipitación mensual

Se observó que los meses con menos variabilidad de precipitación eran Enero y Octubre con 79.60mm y 79.30mm respectivamente, mientras que Julio y Junio con 244.20mm y 237.80mm presentan mayor variabilidad. El mes de septiembre con 115.20mm no presenta grandes cambios. En la *Figura 24* se puede observar la época seca y de invierno de la región.

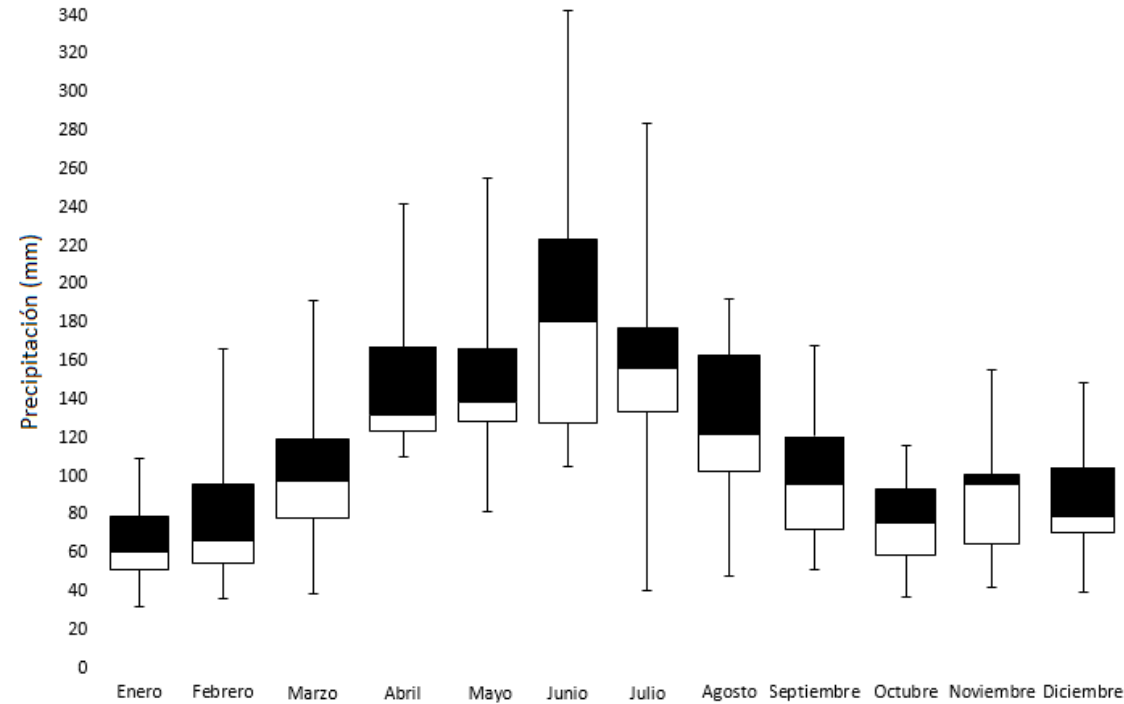


Figura 24. Variabilidad de precipitaciones: El mes de Junio tiene el 50% de sus valores por encima de 180.50mm, se sugiere para próximos estudios la medición del área deslizable en estos meses, para observar la relación entre precipitación con el incremento de áreas deslizables.

La precipitación en el macrodeslizamiento en septiembre del año 2016 fue de aproximadamente 116.91mm, mientras que la precipitación media de la serie histórica de septiembre es de 98.27mm.

Resultados obtenidos con Análisis de precipitación se presentan en la Tabla 9 y en la Figura25:

Tabla 9. Valores del diagrama de caja para precipitación

	Precipitación (mm)	Datos del Gráfico
Mínimo	53.5	53.5
Primer cuartil	75.45	21.95
Mediana	92.2	16.75
Tercer cuartil	117.5	25.3
Máxima	176.3	58.8

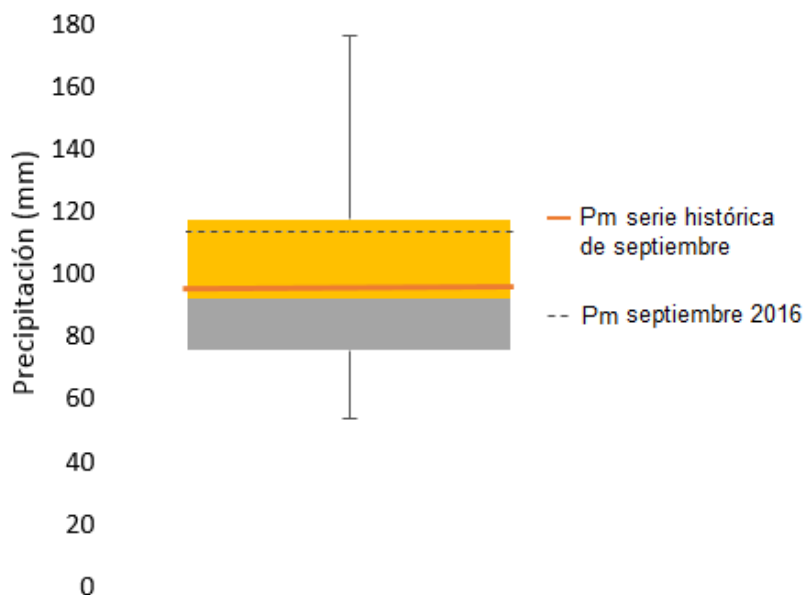


Figura 25. Diagrama de caja de la serie histórica de precipitación: La precipitación de septiembre del 2016, se encuentra dentro del segundo cuartil, con una diferencia de 18.64mm con respecto al caudal medio de la serie histórica de septiembre, sugiere que el mes en el cual se realizó los aforos fue un mes húmedo.

3.6 CAMPAÑA DE AFOROS

Los puntos de aforo en coordenadas UTM fueron los siguientes:

Id	Este (m)	Norte (m)	Cota (msnm)
Quebrada "A"	763796	9702359	2122
Quebrada "B"	763694	9702668	2134

Debido a la falta de disponibilidad de los equipos se aforaron 10 días en Septiembre del 2016 (*Tabla 10*), con el fin de obtener un caudal medio mensual, que se puedan comparar con la series históricas de caudales del mes de septiembre obtenidas a partir de la trasposición de caudales de las series históricas de la estación Collay, y los métodos de balance hídrico.

Tabla 10. Aforos en las quebradas de Llamacón

Fecha	Quebrada "A" (mm)	Quebrada "B" (mm)
15/09/2016	19.25	20.32
16/09/2016	18.31	23.49
17/09/2016	16.71	19.85
18/09/2016	16.09	13.34
21/08/2016	20.85	30.44
22/08/2016	14.87	25.32
23/08/2016	21.75	24.60
28/08/2016	18.64	20.58
29/08/2016	15.35	21.17
30/08/2016	14.58	20.05
Q_{Mensual}	17.64	21.92

Puntos de aforo: En la *Figura 26* se muestran las imágenes en campo de los puntos de aforo el ítem a) corresponde a QA y b) corresponde a QB

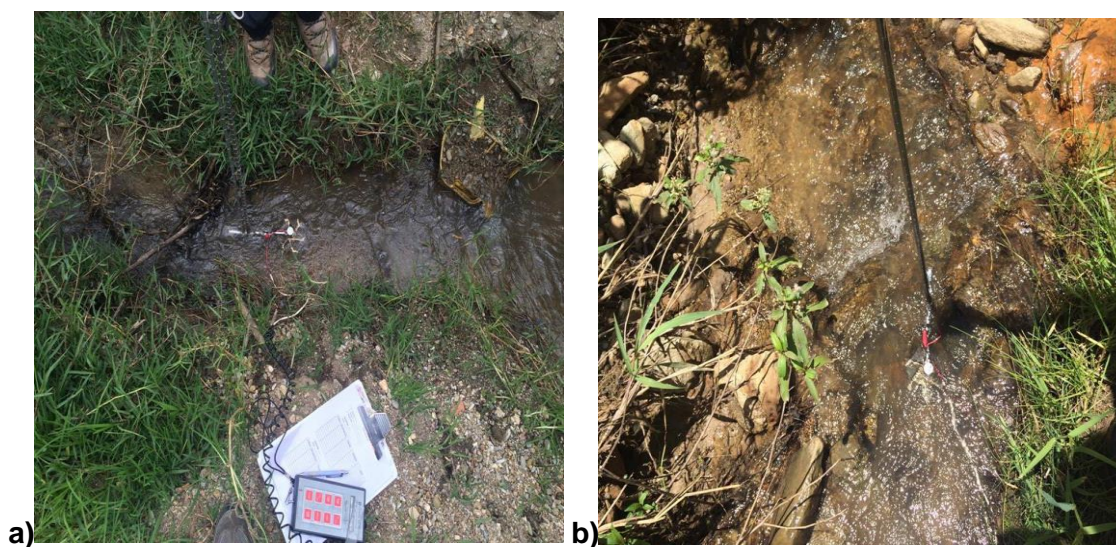


Figura 26. Puntos de aforo

3.7 DISCUSIÓN DE RESULTADOS MÉTODOS

La precipitación de septiembre del 2016, da como resultado un mes húmedo (respecto a la serie histórica), con esta observación se comparan los métodos en los siguientes gráficos.

QUEBRADA "A"

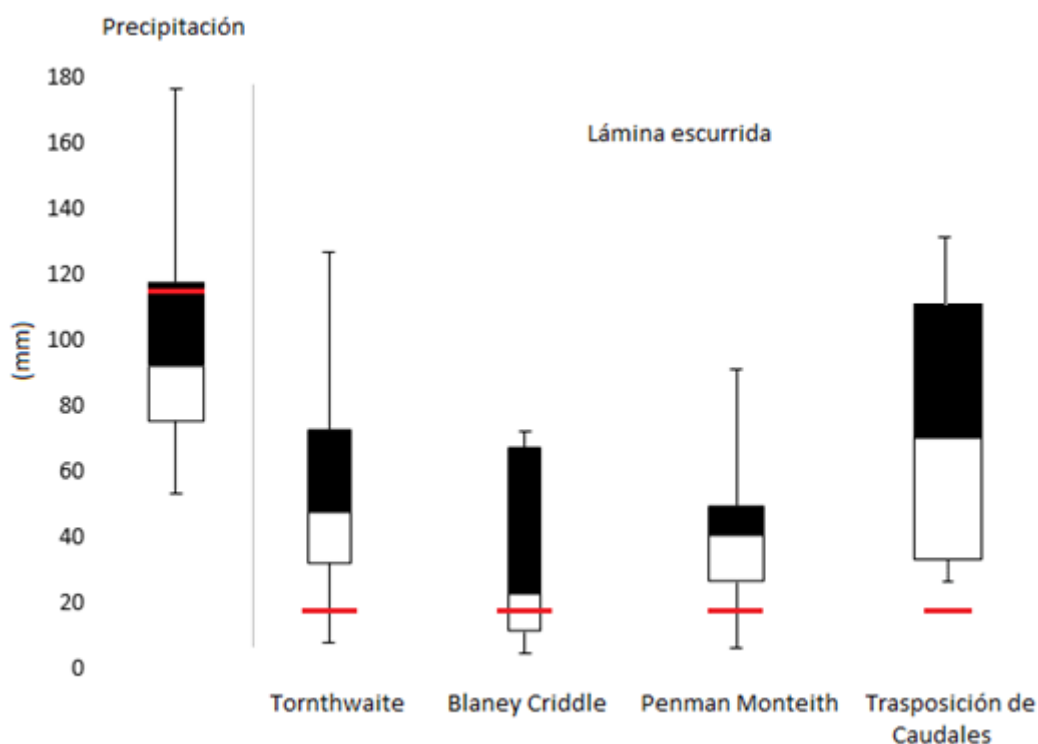


Figura 27. Resultados obtenidos en la quebrada "A"

En la Figura 27 los métodos de Thornthwaite y Penman-Monteith se observa que el caudal aforado se encuentra fuera de la zona de confianza indicando una posible infiltración de agua, en el método de transposición de caudales el fenómeno es más visible ya que el caudal se encuentra en la zona atípica indicando gran pérdida de caudal a lo largo del trayecto de las quebradas, el método de Blaney Criddle no muestra claramente el fenómeno de infiltración.

QUEBRADA "B"

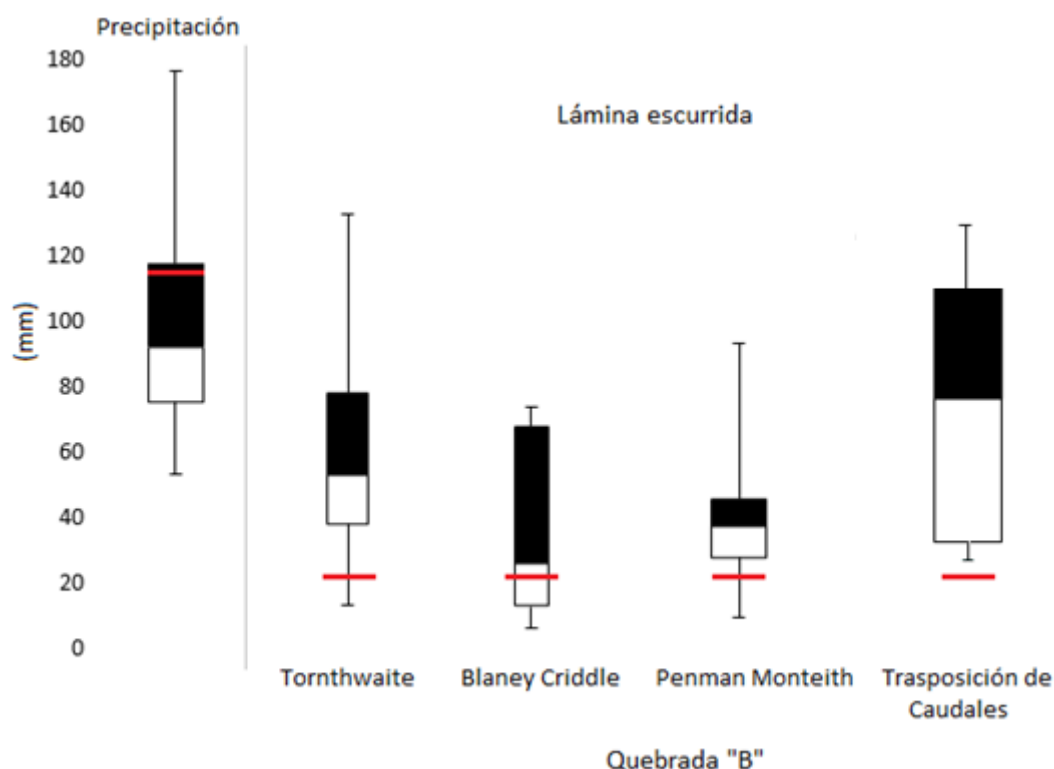


Figura 28. Resultados obtenidos en la Quebrada "B"

En la Figura 28 los métodos de Thornthwaite, Penman-Monteith indican una posible infiltración de agua, con el método de transposición de caudales el fenómeno es más visible ya que el caudal aforado se encuentra fuera del diagrama de caja, en la zona atípica, el método de Blaney Criddle no muestra la existencia de infiltración de agua.

3.8 OBRAS HIDRÁULICAS

ELECCIÓN DE PUNTOS FIJOS PARA AFOROS

Los puntos de aforo en los cauces principales fueron seleccionados según los siguientes criterios de topografía, accesibilidad y un punto cercano a la desembocadura, ya que cauces secundarios como cunetas y acumulaciones de agua aportan al flujo. Se buscó un tramo recto con una sección transversal donde sea apropiada la implementación del equipo. Y son los mismos puntos donde se realizó la campaña de aforos para el mes de septiembre.



3.8.1 DISEÑO DE VERTEDEROS

Caudal de diseño

	$Q_{max} \text{ m}^3/\text{s}$	$1.2Q_{max} \text{ m}^3/\text{s}$
QA	0.208	0.250
QB	0.488	0.586

Para los cálculos de los vertederos las dimensiones están en función de la altura y el resultado se muestra en la *Tabla 11*.

Tabla 11. Diseño Vertederos

Parámetros		Dimensiones Vertedero Rectangular		
		definidas	A	B
Q	m ³ /s		0.263	0.628
C	-		0.60	0.60
H	m		0.30	0.40
B	m	3h	0.90	1.40
B	m	4.5h	1.35	2.10
P	m	0.5h	0.15	0.20

Los esquemas de los vertederos en la *Figura 29*. El ítem a para la quebrada QA y b para la quebrada QB

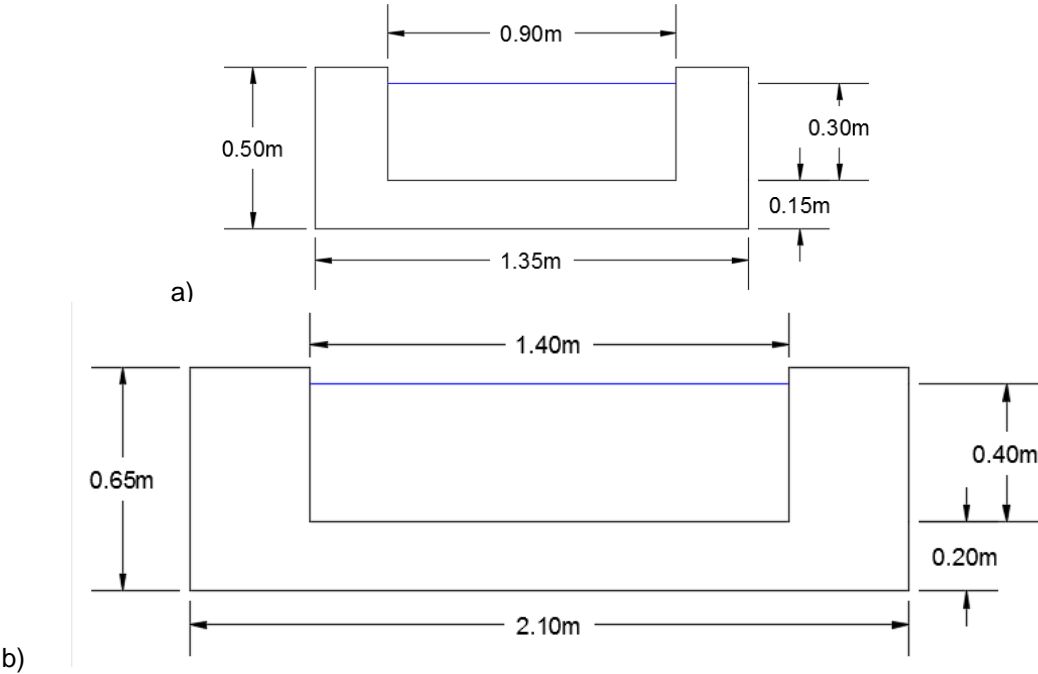


Figura 29. Esquema del diseño de vertederos para QA y QB.



CONCLUSIONES

Los límites del macrodeslizamiento han cambiado constantemente desde 1984 (con un área 13.2ha) hasta 2007 (con un área de 25ha), el área afectada ha tenido una tasa de crecimiento igual a 0.51 ha/año, mientras que desde 2007 hasta 2016 (con un área de 99ha) la tasa de crecimiento ha sido igual a 8.22 ha/año, lo que significa que los últimos 9 años el deslizamiento ha evolucionado 16 veces más rápido con respecto a años anteriores al 2007 (*Anexo 1*), esto se debe a varios factores como infiltración y movimientos sísmicos, los mismos que se pudieron comprobar en las visitas de campo, Ej. Posterior al terremoto del 16 de abril del 2016 aparecieron nuevas grietas que modificaron los límites (un aumento de aprox. 4.2ha).

Las principales quebradas y grietas más antiguas fueron fáciles de reconocer mediante fotointerpretación, con las visitas al campo se georreferenció los puntos principales: grietas, acumulación y ojos de agua que se muestran en el *Anexo 8*. Esta información fue útil para validar los resultados obtenidos en el análisis de caudales, los cuales sugieren una posible infiltración de agua en el suelo.

Debido a que el macrodeslizamiento se encuentra en la estribación montañosa oriental con una gran influencia del régimen de humedad de la Amazonía, éste se encuentra bajo el régimen pluvial persistente muy húmedo, se podría decir que la medición de caudales se realizó al finalizar la época de invierno, en septiembre, cuando en el régimen de precipitaciones comienza la época seca de la región.

Se realizó el análisis de infiltración de caudales con la ecuación del balance hídrico, debido a que la zona de estudio es una microcuenca relativamente pequeña (99ha), con un terreno fuertemente accidentado con una pendiente media de -20.26%, en dirección al embalse, facilitando el drenaje superficial. La cobertura vegetal predominante es pasto (altura de 3cm – 6cm), usado para ganadería extensiva, lo que evita que se retenga grandes cantidades de agua por largos períodos de tiempo. Todas estas razones evitan que exista un desfase entre precipitación que pasa a ser escorrentía, este desfase se refiere por ejemplo a que la precipitación de un mes_i sea almacenada como agua subterránea o subsuperficial y pase a escorrentía superficial en el mes_{i+1} (lo que provocaría error al usar estos métodos para el cálculo de caudales mensuales).



Los métodos de Thornthwaite, Penman-Monteith y transposición de caudales mostraron el mismo fenómeno, los 3 indican una posible pérdida de agua por infiltración, ya que el caudal aforado medido no se encontraba en la zona de confianza (fuera de la caja), con el método de transposición de caudales, el caudal aforado estaba fuera del diagrama de caja (en la zona atípica) lo que indica de una manera más visible una posible pérdida de agua por infiltración. A excepción de Blaney Criddle, los análisis de caudales sugieren el mismo resultado, sin embargo esto no es totalmente cierto, debido a que la escorrentía superficial depende de la precipitación, ya que existe una correlación entre precipitación y escorrentía (*Anexo 9*), considerando que los aforos se hicieron en septiembre del 2016, existía la posibilidad de que si el mes hubiese sido seco se hubiera esperado un caudal bajo, lo que podría explicar los valores obtenidos en los aforos, por esto se realizó un análisis de precipitación mensual de septiembre, y el resultado obtenido apoya aún más la posible existencia de infiltración de agua en el macrodeslizamiento, ya que septiembre del 2016 mostró ser un mes húmedo con una precipitación cerca de 116.91mm, estando por encima con 18.64mm con respecto a la precipitación media mensual histórica de septiembre con 98.27mm.

Para los resultados obtenidos mediante la transposición de caudales no existe una correlación entre precipitación y escorrentía, esto se debe a que los datos usados de caudal para éste método corresponden a la cuenca del río Collay, la cual tiene un área de 23936 ha, cerca de 242 veces más grande que el área del macrodeslizamiento, por lo tanto no cumple los criterios necesarios para poder asumir que la precipitación se descarga como escorrentía superficial instantánea en el embalse de Mazar.

El método de Blaney Criddle mostró que el caudal aforado estaba en la zona de confianza de la serie histórica, indicando que no existe infiltración, sin embargo éste método fue el que más error produjo (se generó una gran cantidad de valores negativos en la lámina escurrida *Anexo 3*), esto puede deberse a que los valores de evapotranspiración obtenidos fueron altos, ya que este método es usado comúnmente para terrenos con cultivos, en donde se sobredimensiona la evapotranspiración para el período de crecimiento en los cultivos (el área de estudio solo presenta un 4% de cultivo *Tabla 7*).



Los resultados obtenidos mediante el análisis de caudales, junto con las visitas de campo en donde se observó una gran cantidad de ojos de agua en donde ésta se acumulaba y no era encausada, muestran una gran posibilidad de que exista una gran influencia de la infiltración de agua en el macrodeslizamiento, se sugiere que con los vertederos diseñados se realice el mismo análisis de infiltración de caudales, el mismo que será más preciso debido a la continuidad de los aforos de caudal, y con estudios posteriores se podrá validar la ecuación de balance hídrico para análisis de infiltración de caudales en microcuencas que cumplan las condiciones anteriormente mencionadas.



BIBLIOGRAFÍA

- Chow, V.T., Maidment, D.R. y Mays, L.W., 1996. *Hidrología aplicada*. S.l.: McGraw-Hill. ISBN 978-958-600-171-7.
- Díaz, J.M.G., 2003. *Métodos de estimación y ajuste de datos climáticos*. S.l.: CDCH UCV. ISBN 978-980-00-1965-8.
- Food & Agriculture Org., 2006. *Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*, 2006. S.l.: ISBN 978-92-5-304219-7.
- Ing. David Granja I.R.V. & Felipe Vintimilla, 2014. *Informe Técnico del Macrodeshlizamiento de Llamacon*. Corporación Eléctrica del Ecuador - CELEC EP. Enero 2014. S.l.: s.n.
- Javier Almorox Alonso, 2003. *Climatología aplicada al medio ambiente y agricultura*. Primera Edición. Madrid España: Universidad Politécnica de Madrid. ISBN 84-7401-179-5.
- Juan Santiago Leiton Soubannier, 1985. *Riego y Drenaje*. S.l.: EUNED. ISBN 978-9977-64-994-8.
- Instituto Geológico y Minero de España, 2006. *Manual de ingeniería de taludes*. S.l.: IGME. ISBN 978-84-7840-626-5.
- Pourrut, P., 1995. *El agua en el Ecuador: clima, precipitaciones, escorrentía*. S.l.: Corporación Editora Nacional.
- Ramiro Ortiz Flórez, 2011. *Pequeñas Centrales Hidroeléctricas*. Primera Edición. Bogotá: Ediciones de la U. ISBN 978-958-8675-99-2.
- Rene Montoya, 2006. *Climas del Ecuador 2006*. Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología - INAHMI. S.l.: s.n.
- Boris Abril & Donald Knight., 1993. *Stabilising the Paute river in Ecuador*, Volume 157 Issue 1. ISSN 0965-089X | E-ISSN 1751-7672



Programa para el Manejo del Agua y del Suelo - PROMAS. 2011., *Atlas Temático de la cuenca del río Paute.*, CG Paute

Instituto de Hidrología de España. 1981., *Métodos de cálculo de balance hídrico.*, Studies and Reports in Hidrology., N°17 ISBN 84-500-5081-2.

Grupo de Estándares para Movimientos en Masa – GEMMA. 2007., *Movimientos en Masa en la Región Andina.* Servicio Nacional de Geología y Minería., Publicación Geológica Multinacional N°4., ISSN 0717-3733

Food and Agriculture Organization of the United Nations. 1996., *Planificación y ordenación de cuencas hidrográficas con ayuda de computadora: tecnologías para la planificación nacional.* Food & Agriculture Org. ISBN: 978-92-5-303793-3

Caracterización hidrológica del valle del río Cachapoal, sector Peumo-Las Cabras, usando un sistema de información geográfica. 2003., Universidad de Concepción. Chile

Juan María Gisbert Gallego, 2005., *Caracterización hidrológica y de los procesos erosivos en la cabecera del río Monachil (Granada)*, Universidad de Almería., ISBN: 978-84-8240-529-2

Ayako Nagase. 2012., *Amount of water runoff from different vegetation types on extensive green roofs: Effects of plant species, diversity and plant structure.*, Chiba University. URL: <http://researchgate.net/publication/230887969>.

Servicio Geológico de Estados Unidos., *Glosario Surface water runoff.* The USGS Water Science School. URL: <http://water.usgs.gov/edu/runoff.html>.

United States Department of Agriculture, 1999., *A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Survey.*, Second Edition N°436., URL: https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs142p2_051232.pdf.



- Food & Agriculture Org., 1991. *A Manual for the Design and Construction of Water Harvesting Schemes for Plant Production*. URL: <http://www.fao.org/docrep/u3160e/u3160e07.htm>
- Food & Agriculture Org., 2001. *Agroforestería para la producción animal en América Latina. N°155.*, URL: <http://ftp.fao.org/docrep/fao/005/y4435s/y4435s00.pdf>
- J. Chyba¹, M. Kroulík, K. Krištof, P.A. Misiewicz, K. Chaney³, 2014., *Influence of soil compaction by farm machinery and livestock on water infiltration rate on grassland.*, Agronomy Research Vol. 12.
- Norma Técnico CETESB L4.120.1^a, *Vertederos de Pared Delgada*, Compañía Ambiental de São Paulo, Brasil.

ANEXOS

Anexo 1. Evolución del macrodeslizamiento.

Tabla 12. Área afectada en años donde se han hecho control del macrodeslizamiento.

Año	Área (ha)
1984	13,2
2007	25
2016	99

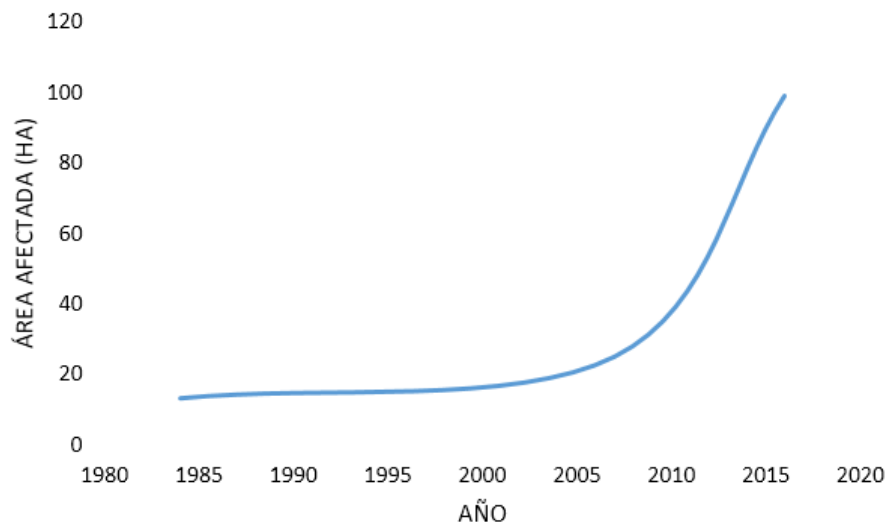


Figura 30. Área de deslizamiento según año: Existe una aceleración del deslizamiento entre el período de 2005 y 2010.

Tabla 13. Tasa de aceleración del incremento del área deslizable en el macrodeslizamiento entre el período de 1984 y 2016.

Año	Tasa (ha/año)
1984	0,00
2007	0,51
2016	8,22

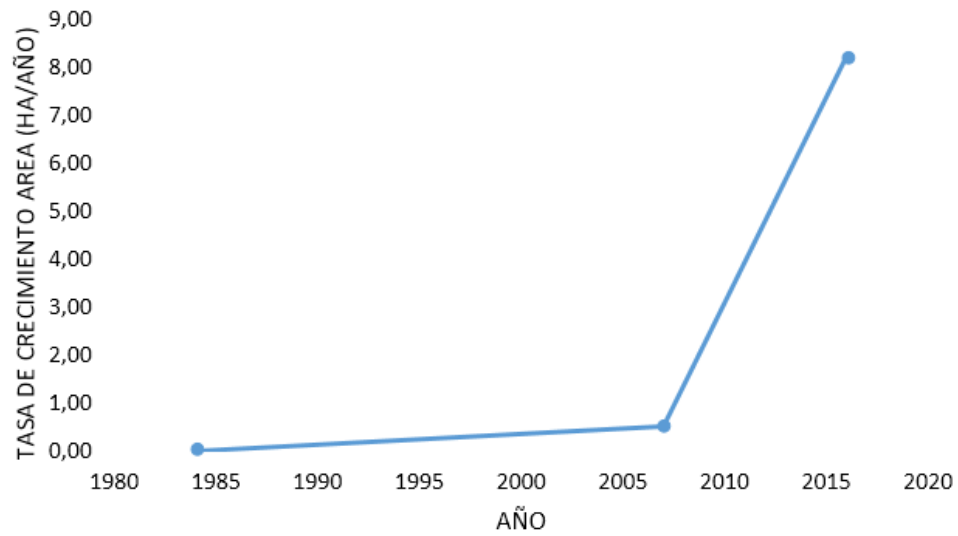


Figura 31. Tasa de incremento del área del deslizamiento por año: Se observa que ha crecido cerca de 16 veces desde 1984 hasta 2016.



Anexo 2. Ficha técnica Método de Campo

Ficha DATOS GPS

- Número
- Fecha

#	x	y	z	Observación

Esquemas



Anexo 3. Métodos para la determinación de caudales

Tabla 14. Caudales Río Collay

Septiembre - Año Caudal Collay AJ Paute (m3/s)

1965	3,42
1966	2,21
1967	2,48
1968	17,83
1970	15,87
1971	19,98
1972	14,07
1973	8,14
1974	8,00
1975	8,66
1976	8,35
1977	5,25
1978	3,26
1979	2,17
1980	5,67
1981	2,29
1982	2,43
1983	3,20
1984	2,20
1985	1,97
1986	8,60
1987	3,90
1988	2,35
1990	2,37
1998	9,13
2001	5,29
2002	9,34
2003	4,71
2005	7,26
2006	9,48
2007	8,33
2008	9,72



Tabla 15. Serie de caudales generada con Trasposición de Caudales

Año	Trasposición de Caudales	
	Quebrada "A"	Quebrada "B"
	(l/s)	(l/s)
1974	57.75	135.72
1975	62.54	146.99
1976	60.26	141.62
1977	37.93	89.14
1978	23.54	55.32
1979	15.67	36.83
1980	40.95	96.26
1981	16.54	38.88
1982	17.55	41.25
1983	23.07	54.21
1984	15.87	37.30
1985	14.22	33.41
1986	62.07	145.88
1987	28.18	66.22
1988	16.95	39.83
1990	17.08	40.15
1998	65.90	154.88
2001	38.19	89.75
2002	67.42	158.46
2003	33.98	79.86
2005	52.41	123.17
2006	68.46	160.90
2007	60.09	141.24
2008	70.18	164.94



Tabla 16. Serie de caudales generada con Penman-Monteith

Penman-Monteith		
Año	Quebrada "A" (l/s)	Quebrada "B" (l/s)
1990	5.49	9.07
1992	25.79	28.26
1995	30.24	32.62
2000	99.19	102.26
2002	44.10	41.00
2004	59.56	62.57
2005	42.49	39.30
2006	49.17	52.20
2007	33.74	36.37
2008	48.92	51.69
2011	113.41	115.59
2012	33.05	30.51

Tabla 17. Serie de caudales generada con Thornthwaite

Thornthwaite		
Año	Quebrada "A" (l/s)	Quebrada "B" (l/s)
1974	64.93	158.72
1975	22.72	60.05
1976	4.33	16.73
1977	35.02	89.52
1978	67.32	165.16
1979	8.05	25.65
1980	42.14	105.35
1981	16.93	46.66
1982	15.36	42.57
1983	25.84	67.20
1984	26.70	69.49
1985	23.57	62.10
1986	68.25	167.68
1987	24.22	63.73
1988	3.41	14.64
1990	26.15	68.18
2001	19.76	52.79
2002	2.66	12.90
2003	17.39	47.88
2005	4.76	17.97
2006	43.51	108.79
2007	35.77	90.08
2008	39.07	98.44



Tabla 18. Serie de caudales generados con Blaney Criddle

Blaney Criddle		
Año	Quebrada "A" (l/s)	Quebrada "B" (l/s)
1974	37.70	89.70
1977	5.04	13.11
1978	36.74	87.60
1986	38.49	91.69
1987	5.64	12.04
1992	2.39	6.83
1995	5.51	14.12
2000	35.40	84.37
2004	17.70	42.83
2006	13.17	32.17
2007	6.25	15.84
2008	9.71	24.03
2011	33.20	79.20



Anexo 4. Clasificación de cuenca y relieve

Tabla 19. Clasificación de las cuencas por su tamaño según Centro Interamericano de Desarrollo Integral de Aguas y Suelos citado por Aguirre (2007).

Clasificación de las cuencas por su tamaño

Tipo	Área (ha)
Sistema hidrográfico	+ de 300000
Cuencas	60000-300000
Subcuencas	10000-60000
Microcuencas	< 10000

Tabla 20. Caracterización de Heras del relieve según la pendiente

Caracterización de relieve según Heras

Pendiente en porcentaje	Tipo de terreno
2	Llano
5	Suave
10	Accidentado medio
15	Accidentado
25	Fuerte Accidentado
50	Escarpado
>50	Muy escarpado

Anexo 5. Presión y constante psicrométrica según altitud.

Presión atmosférica

$$P = 101,3 \left(\frac{293 - 0,0065z}{293} \right)^{5,26}$$

Ecuación A41. Presión según altitud

Tabla 21. Presión atmosférica (P) para diferentes altitudes (z)

z	P	z	P	z	P	z	P
(m)	(kPa)	(m)	(kPa)	(m)	(kPa)	(m)	(kPa)
0	101,3	1000	90,0	2000	79,8	3000	70,5
50	100,7	1050	89,5	2050	76,3	3050	70,1
100	100,1	1100	89,0	2100	78,8	3100	69,6
150	99,5	1150	88,4	2150	78,3	3150	69,2
200	99,0	1200	87,9	2200	77,9	3200	68,8
250	98,4	1250	87,4	2250	77,4	3250	68,3
300	97,8	1300	86,8	2300	76,9	3300	67,9
350	97,2	1350	86,3	2350	76,4	3350	67,5
400	96,7	1400	85,8	2400	76,0	3400	67,1
450	96,1	1450	85,3	2450	75,5	3450	66,6
500	95,5	1500	84,8	2500	75,0	3500	66,2
550	95,0	1550	84,3	2550	74,6	3550	65,8
600	94,4	1600	83,8	2600	74,1	3600	65,4
650	93,8	1650	83,3	2650	73,7	3650	65,0
700	93,3	1700	82,8	2700	73,2	3700	64,6
750	92,7	1750	82,3	2750	72,7	3750	64,1
800	92,2	1800	81,8	2800	72,3	3800	63,7
850	91,6	1850	81,3	2850	71,8	3850	63,3
900	91,1	1900	80,8	2900	71,4	3900	62,9
950	90,6	1950	80,3	2950	71,0	3950	62,5
1000	90,0	2000	79,8	3000	70,5	4000	62,1

Constante psicrométrica

$$\gamma = \frac{C_{pP}}{\varepsilon \lambda} = 0.665 * 10^{-3} \quad \text{Ecuación A41. Constante psicrométrica según altitud}$$

Tabla 22. Constante psicrométrica (γ) para diferentes altitudes (z)

Z	γ	z	γ	z	γ	z	γ
(m)	kPa °C ⁻¹	(m)	kPa °C ⁻¹	(m)	kPa °C ⁻¹	(m)	kPa °C ⁻¹
0	0,067	1000	0,06	2000	0,053	3000	0,047
100	0,067	1100	0,059	2100	0,052	3100	0,046
200	0,066	1200	0,058	2200	0,052	3200	0,046
300	0,065	1300	0,058	2300	0,051	3300	0,045
400	0,064	1400	0,057	2400	0,051	3400	0,045
500	0,064	1500	0,056	2500	0,05	3500	0,044
600	0,063	1600	0,056	2600	0,049	3600	0,043
700	0,062	1700	0,055	2700	0,049	3700	0,043
800	0,061	1800	0,054	2800	0,048	3800	0,042
900	0,061	1900	0,054	2900	0,047	3900	0,042
1000	0,06	2000	0,053	3000	0,047	4000	0,041



Anexo 6. Valores del coeficiente global y coeficiente del tipo de cultivo

Tabla 23. Coeficientes Globales de usos consuntivos (Kg) para diferentes cultivos.

Cultivo	Período de crecimiento vegetativo	Coeficientes Globales Kg	
		Región húmeda	Región árida
Aguacate	Todo el año	0.5	0.55
Ajonjolí	3 a 4 meses	0.8	
Alfalfa	Entre heladas	0.8	0.85
	En invierno	0.6	
Algodón	6 a 7 meses	0.6	0.65
Arroz	3 a 5 meses	1	1.2
Cacahuete	5 meses	0.6	0.65
Cacao	Todo el año	0.75	0.8
Café	Todo el año	0.75	0.75
Camote	5 a 6 meses	0.6	
Caña de azúcar	Todo el año	0.75	0.9
Cártamo	5 a 8 meses	0.55	0.65
Cereales de granos pequeños (Alpiste) (Avena) (Cebada) (Centeno) (Trigo)	3 a 6 meses	0.75	0.85
Cítricos	7 a 8 mese	0.5	
Chile	3 a 4 meses	0.6	0.65
Espárrago	6 a 7 meses	0.6	
Fresa	Todo el año	0.45	0.6
Frijol	3 a 4 meses	0.6	0.7
Frutales de hueso y pepita (hoja caduca)	Entre heladas	0.6	0.7
Garbanzo	4 a 5 meses	0.6	0.7
Girasol	4 meses	0.5	0.65
Gladiola	3 a 4 meses	0.6	



Haba	4 a 5 meses	0.6	0.7
Hortalizas	2 a 4 meses	0.6	
Jitomate	4 meses	0.7	
Lechuga y col	3 meses	0.7	
Lenteja	4 meses	0.6	0.7
Lino	7 a 8 meses	0.7	0.8
Maíz	4 a 7 meses	0.75	0.85
Mango	Todo el año	0.75	0.8
Melón	3 a 4 meses	0.6	
Nogal	Entre heladas	0.7	
Papa	3 a 5 meses	0.65	0.75
Palma Datilera	Todo el año	0.65	0.8
Palma de coco	Todo el año	0.8	0.9
Papaya	Todo el año	0.6	0.8
Plátano	Todo el año	0.8	1
Pasto de gramíneas			
Pastos de trébol	Todo el año	0.75	
Ladino	Todo el año	0.8	0.85
Remolacha	6 meses	0.65	0.75
Sandía	3 a 4 meses	0.6	
Sorgo	3 a 5 meses	0.7	
Soya	3 a 5 meses	0.6	0.7
Tabaco	4 a 5 meses	0.7	0.8
Tomate	4 a 5 meses	0.7	
Zanahoria	2 a 4 meses	0.6	

Tabla 24. Coeficientes de cultivo (Kc) para cultivos perennes.

Mes	Caña	Alfalfa	Pasto	Vid	Cítricos	Frutales de hoja caduca	Frutales de hoja perenne
1	0.30	0.65	0.48	0.20	0.65	0.20	0.60
2	0.35	0.75	0.60	0.23	0.67	0.25	0.75

Autoría: Paula Gutiérrez Neira
Pedro Sánchez León



3	0.50	0.85	0.75	0.30	0.69	0.35	0.85
4	0.60	1.00	0.85	0.50	0.70	0.65	1.00
5	0.77	1.10	0.87	0.70	0.71	0.85	1.10
6	0.90	1.13	0.90	0.80	0.72	0.95	1.12
7	0.98	1.12	0.90	0.80	0.72	0.98	1.12
8	1.02	1.08	0.87	0.75	0.71	0.85	1.05
9	1.02	1.00	0.85	0.67	0.70	0.50	1.00
10	0.98	0.90	0.80	0.50	0.68	0.30	0.85
11	0.90	0.80	0.65	0.35	0.67	0.20	0.75
12	0.78	0.65	0.60	0.25	0.65	0.20	0.60



Anexo 7. Ficha técnica para el registro de aforos de caudal

Ficha de aforos

- Número
- Fecha
- Clima 24h
- Quebrada
- Hora

# Aforo	Revoluciones	Tiempo	Velocidad	Nota

Anexo 8. Mapa de levantamiento de puntos de influencia en el macrodeslizamiento.

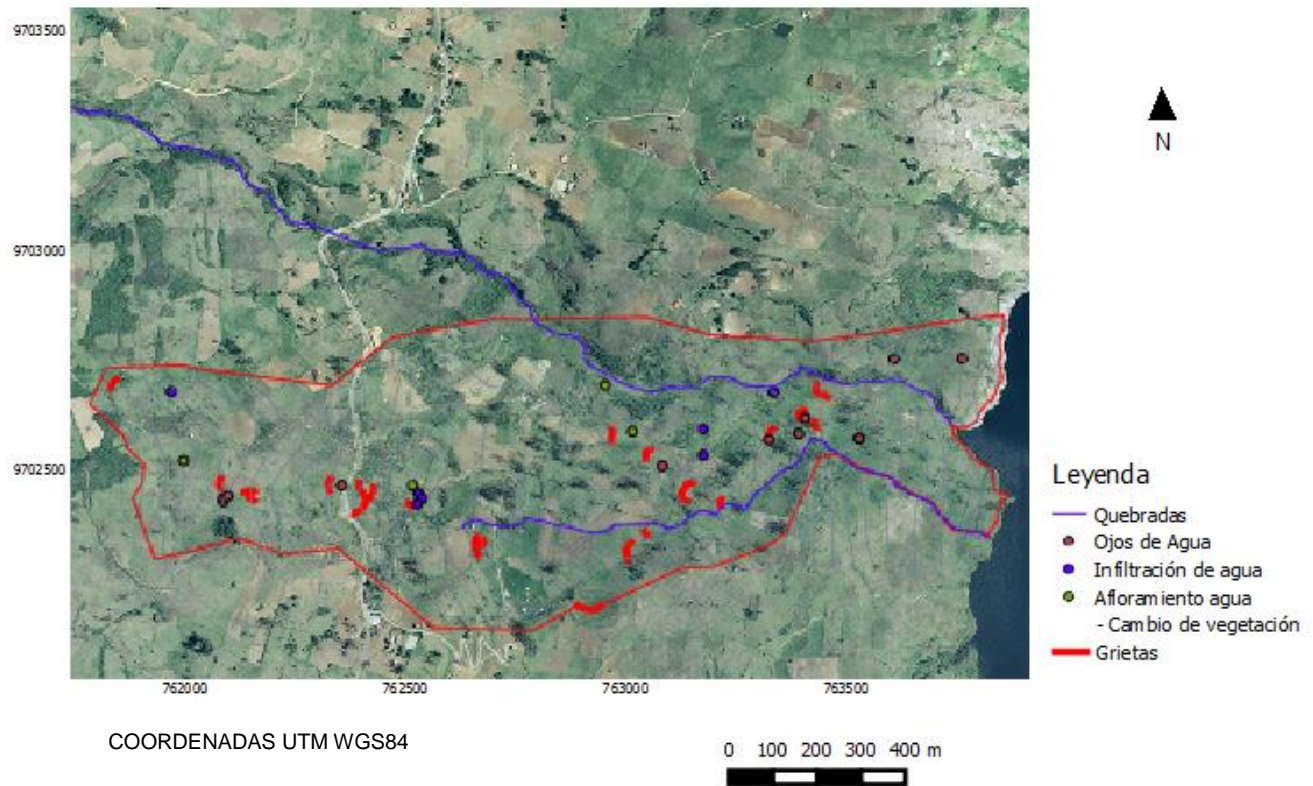


Figura 32. Mapa levantamiento geológico: Grietas transversales que indican un deslizamiento de subtipo rotacional, debido a la gran cantidad de ojos de agua, infiltración de agua, y cambios de vegetación el levantamiento muestra la influencia del agua en el aceleramiento del macrodeslizamiento.

A continuación se presenta una serie de fotografías que se tomaron en campo y son una confirmación visual de lo que se encontró en el macrodeslizamiento. En la *Tabla 25* se encuentra el tipo y un punto georreferenciado de la imagen.

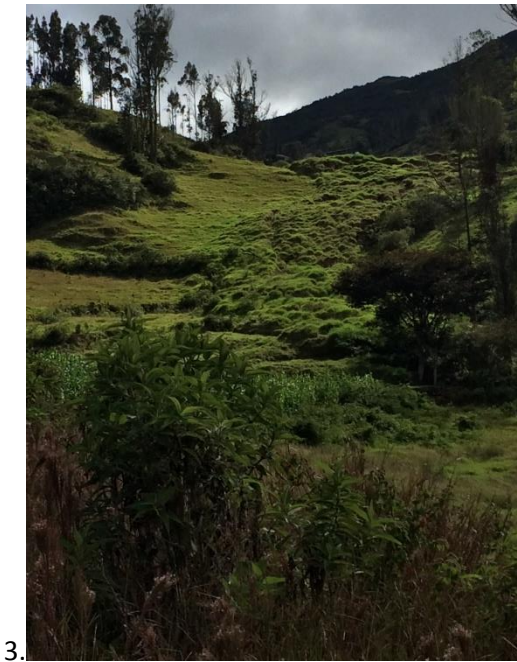
Tabla 25. Fotografías del macrodeslizamiento

Número	Tipo	Este (m)	Norte (m)	Altitud (msnm)
1	Grieta	763006	9702294	2461
2	Grieta	762664	9702347	2482
3	Grieta	763170	9702367	2418
4	Grieta	762937	9702183	2492
5	Grieta	762678	9702336	2506
6	Grieta	763136	9702462	2390
7	Grieta	763431	9702679	2272
8	Grieta	763414	9702626	2285
9	Grieta	762678	9702336	2506
10	Canal	762649	9702360	2483
11	Canal	762429	9702460	2559
12	Canal	762531	9702446	2502
13	Ojo de agua	762580	9702426	2518
14	Ojo de agua	763530	9702571	2247
15	Ojo de agua	762315	9702371	2637
16	Ojo de agua	763430	9702605	2306



1.







10.



13.



14.



11.



15.



12.



16.

Anexo 9. Análisis de correlación entre métodos de evapotranspiración y precipitación.

En los métodos de cálculo de evapotranspiración existe una correlación entre precipitación y escurrida gracias a los valores relativamente constantes hallados con la evapotranspiración, por lo que se puede hallar la tendencia histórica que tiene la lámina escurrida con respecto a la precipitación, en los métodos de Penman-Monteith y Thornthwaite se puede observar que el existe una pérdida de agua entre el caudal esperado (QE) y el caudal aforado (QA), mientras que el método de Blaney Criddle el valor aforado es igual el valor esperado.

El caudal aforado en la quebrada 1 es igual a 17mm, este se comparó con el caudal esperado en los distintos métodos.

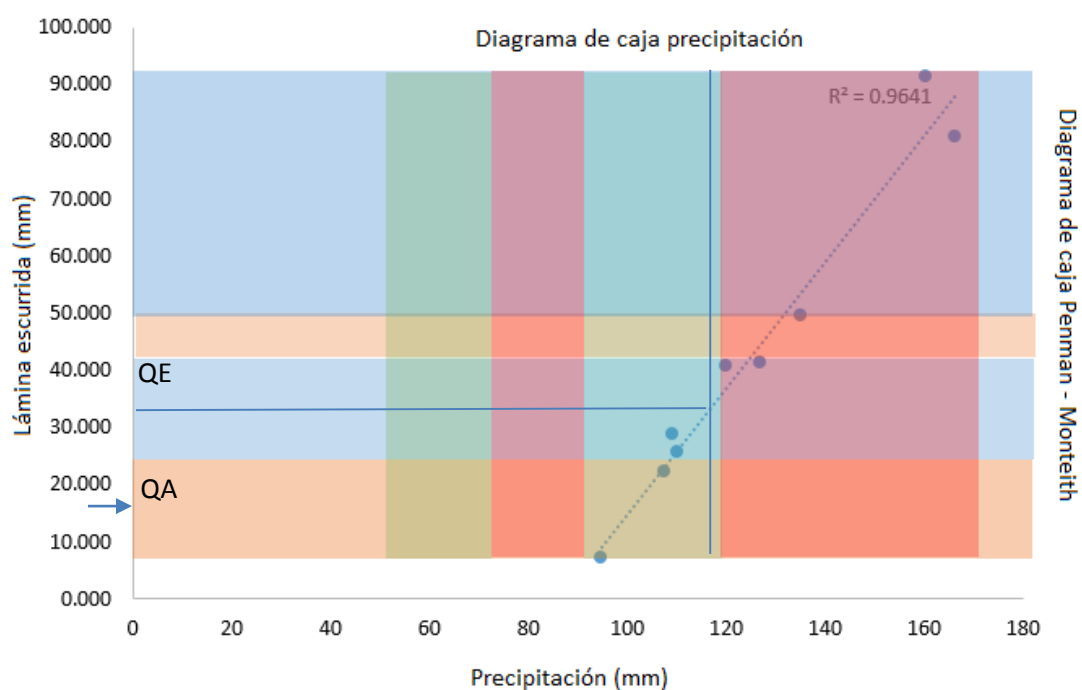


Figura 33. Análisis de correlación entre precipitación y lámina escurrida (Penman-Monteith): Existe una diferencia de aproximadamente 17mm entre el valor de la lámina escurrida esperada (QE) y la lámina escurrida aforada (QA).

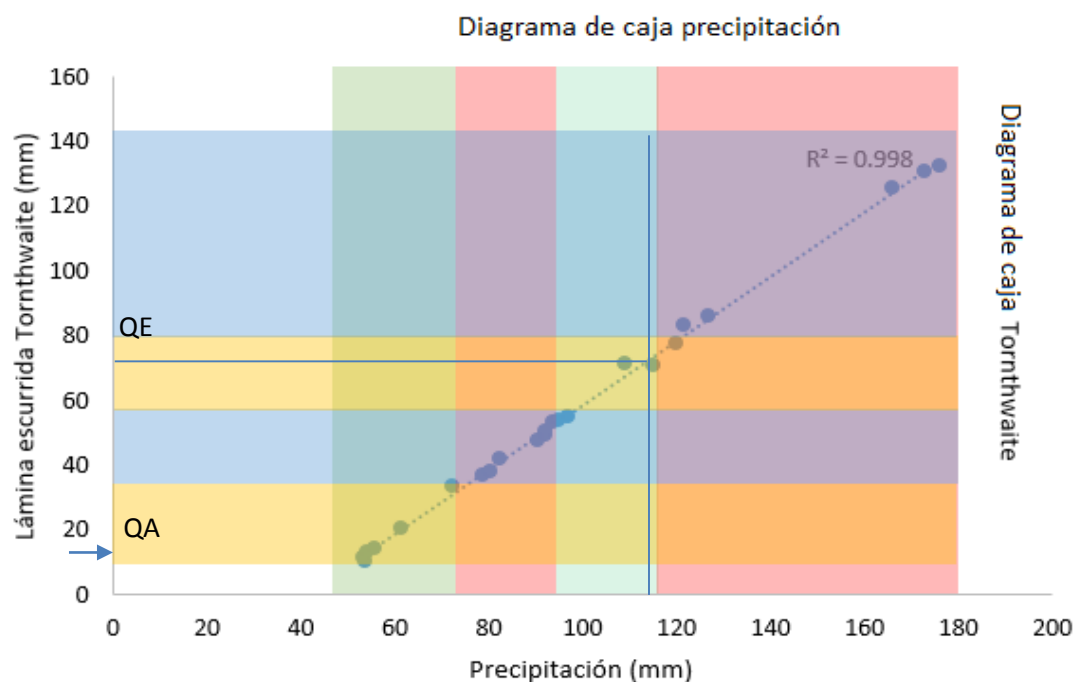


Figura 34. Análisis de correlación entre precipitación y lámina escurrida (Thornthwaite): Existe una diferencia de aproximadamente 56mm entre el valor de la lámina escurrida esperada (QE) y la lámina escurrida aforada (QA), lo que indica una gran pérdida de caudal.

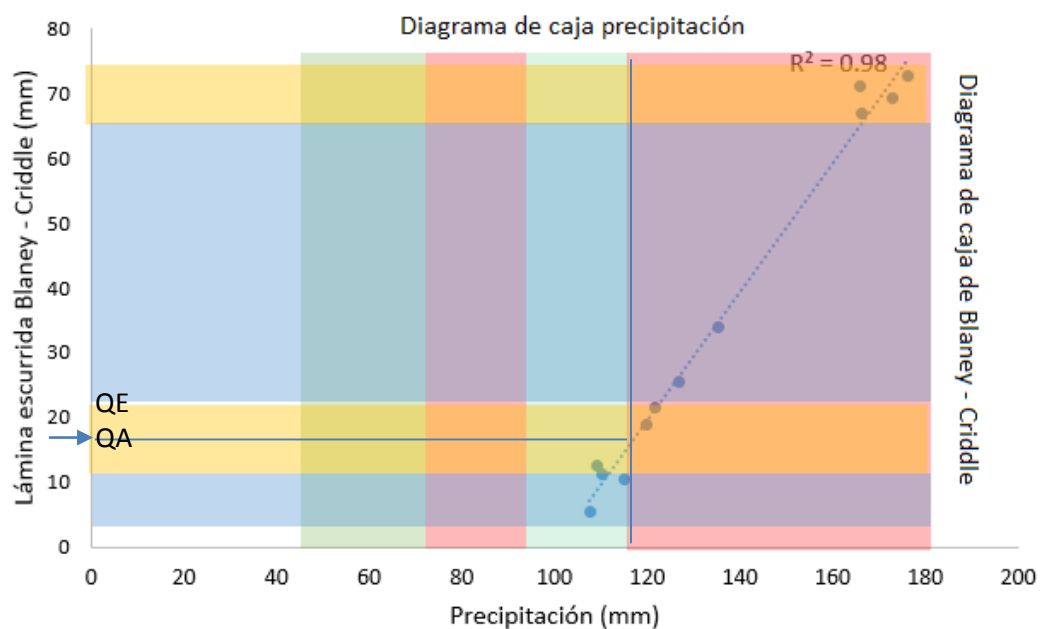


Figura 35. Análisis de correlación entre precipitación y lámina escurrida (Blaney Criddle): El valor del caudal aforado es normal con respecto al valor del caudal esperado, aparentemente según este método se aforó el caudal esperado. (QE = QA).

